322 / 5

R. BRUNETTI

ONDE E CORPUSCOLI

ottantatre figure
tredici tavole fuori testo

EDITORE ULRICO HOEPLI MILANO

In questa collezione

BENITO MUSSOLINI
LA DOTTRINA DEL FASCISMO
seguita da Storia, Opere ed Istituti del Regime
a cura di M. Gallian, A. Marpicati e L. Contu
(54 tavole fuori testo)

EUGENIO GIOVANNETTI
LA RELIGIONE DI CESARE

GIOVANNI PAPINI
STORIA DEI FILOSOFI

UGO D'ANDREA
MUSSOLINI E LE RIVOLUZIONI

CORRADO ALVARO
LA SIBILLA EUROPEA

PAOLO VINASSA DE REGNY
QUANTI ANNI HA LA TERRA?

RITA BRUNETTI
ONDE E CORPUSCOLI

NICOLA FESTA
UMANESIMO

ALBERTO CONSIGLIO
CINEMA: ARTE E LINGUAGGIO

RUDOLF ARNHEIM
FORMA DELLA RADIO

GIUSEPPE UNGARETTI
STORIA DELLA POESIA

S. A. LUCIANI
MILLE ANNI DI MUSICA

G. A. BRAGAGLIA
ESTETICA DELLA DANZA

GIUSEPPE COLOSI
ORGANISMI E VITA

M. ARMANNI
LA VITA ITALIANA NEL LIBRO ANTICO

J. EVOLA
RAZZISMO

G. PRAMPOLINI
PANORAMA DELLE LETTERATURE CONTEMPORANEE

GINO SEVERINI
RAGIONAMENTI SULLA PITTURA

G. S. SPINETTI
MISTICA FASCISTA

322/5 P 28

ATTENZIONE.

signori che prelevano i libri sono pregati,
itare smarrimenti, di non cederli ad altre per=
e non attraverso l'addetto alla Biblioteca
a.

OLIVETTI - T
3896

COLLEZIONE HOEPLI

ONDE E CORPUSCOLI

COLLEZIONE HOEPLI

Questa raccolta, che vuole aderire strettamente al tempo di Mussolini, allinea i suoi eleganti e sobri volumi di seguito alle due serie — le quali continueranno ad accrescersi ed a rispondere alle necessità per le quali furono create — dei Manuali e dei trattati della Biblioteca Tecnica, gli uni intesi alla formazione autodidattica od alla consultazione, gli altri all'inizio ed al perfezionamento di un coordinato studio tecnico scientifico.

I volumi della Collezione Hoepli — meno utilitari ma ricchi di nutrimenti spirituali — vanno annoverati più propriamente fra i Saggi che hanno nel nostro Paese lontana e nobilissima tradizione; e al pari dei Saggi classici possono cogliere tutte o solo alcune parti di un determinato argomento particolare o generale, ponendo all'oggetto della scrittura inattese o inusate prospettive, sempre personali e talvolta anche polemiche.

Sintesi vissute e dichiarate da artisti, pensatori, politici e scienziati che partecipano cordialmente della realtà, delle aspirazioni e dei problemi del nostro tempo, — questi libri non saranno però aridi tessuti di nozioni e di dati; ma interpretazioni quant'è possibile attuali ed orientamenti, maturatisi nella mente dei singoli autori attraverso una decisa e conclusiva esperienza, capaci di offrire amichevole sussidio agli esperti d'una disciplina che vogliano rivivere le ansie degli studiosi d'altri settori della vita e del sapere.

L'intento divulgatore della Collezione è, così, evidente; ma sarà divulgazione dignitosa e fedele, in uno stile semplice e pure non piatto, senza pedanterie scolastiche e senza banali facilità.

Architettando la Collezione abbiamo voluto servire ancora il proposito di assecondare in ogni tempo le esigenze della cultura italiana, al quale diamo da cinquant'anni il meglio di noi stessi, oggi coll'entusiasmo che sorrise al primo Manuale. E la nuova raccolta avrà senza dubbio il suo inconfondibile pubblico e la sua non inutile fortuna.

Ulrico Hoepli

Novembre XIII

322/5

R. BRUNETTI

ONDE E CORPUSCOLI

ottantatre figure
tredici tavole fuori testo

OLIVETTI - T
3896

EDITORE ULRICO HOEPLI MILANO
1936-XIV

93.977

SISTEMA BIBLIOTECARIO
POLITECNICO DI TORINO
CAT. 2 N. 38481

TUTTI I DIRITTI SONO RISERVATI
COPYRIGHT BY ULRICO HOEPLI, MILAN, 1935
STAMPATO IN ITALIA

INDICE

PREFAZIONE . . . . . *VII*

CAPITOLO I

GLI STRUMENTI DELLA FISICA MODERNA 1

Introduzione. I problemi della transizione fra ottocento e novecento. Lo spettroscopio ottico. Gli spettrografi pei raggi X. I corpuscoli e i loro spettrogrammi. La camera di condensazione. Le camere di ionizzazione (i contatori di fotoni e di particelle). I nuovi strumenti e la tecnica.

CAPITOLO II

IL DUALISMO DELL'ENERGIA RADIANTE 33

Il dualismo nella propagazione della luce. Il dualismo nell'emissione della luce. L'ipotesi del PLANCK (i quanti). L'effetto fotoelettrico. L'effetto Compton. Relazione fra i dualismi della luce.

CAPITOLO III

ONDE E MATERIA 59

La diffrazione della luce. La diffrazione dei raggi X e degli elettroni. L'indice di rifrazione per gli elettroni. La struttura dell'elettrone come pacchetto di onde. Le relazioni fra la teoria ondulatoria e le sue basi sperimentali.

CAPITOLO IV

INDETERMINAZIONE E PROBABILITÀ NELLA FISICA ATOMICA 89

La rappresentazione e la traiettoria delle onde. L'equazione di SCHRÖDINGER. Il significato di ψ. Il principio di indeterminazione. Come la meccanica ondulatoria risolve i problemi fisici. Conclusione.

CAPITOLO V

PAESAGGI ATOMICI 119

La legge del RITZ. L'ipotesi del BOHR. Le esperienze di FRANCK ed HERTZ. L'emissione dei raggi X. Il numero atomico e la tavola periodica degli elementi. Il modello dell'atomo nella meccanica ondulatoria. Conclusioni.

CAPITOLO VI

LA RADIOATTIVITÀ 153

La scoperta delle radioattività. La natura delle radiazioni emesse dai corpi radioattivi. La sede del processo radioattivo. Il "caso" nei processi radioattivi. Il diametro nucleare. L'energia nucleare e la barriera di potenziale. Il meccanismo delle trasmutazioni spontanee degli elementi. I raggi γ. Il problema dei raggi β.

CAPITOLO VII

LE TRASMUTAZIONI ARTIFICIALI DELLA MATERIA . 185

Introduzione. La disintegrazione con particelle α. Il neutrone. Le disintegrazioni con protoni e con diploni veloci. La disintegrazione con neutroni. La disintegrazione per raggi γ e raggi X di grande energia. La struttura nucleare e i raggi β.

CAPITOLO VIII

LA RADIAZIONE COSMICA 215

Introduzione. La scoperta dei raggi cosmici. Il periodo fisico dello studio dei raggi cosmici. I dubbi sulla natura dei raggi cosmici. La radiazione cosmica contiene corpuscoli. Reazioni fra raggi cosmici e materia. L'elettrone positivo. La materializzazione dell'energia radiante.

CAPITOLO IX

LA RADIOATTIVITÀ ARTIFICIALE 241

L'origine del fenomeno. La scoperta della radioattività artificiale prodotta da particelle α. La radioattività prodotta da neutroni. I neutroni lenti. Le energie nucleari. Conclusione.

INDICE DEI NOMI 267

INDICE ANALITICO 269

PREFAZIONE

Un gruppo di conferenze, per la massima parte tenute presso il Seminario della Facoltà di Scienze della R. Università di Cagliari, ha dato origine a questo libro.

In particolare è da notare che i due capitoli sulla radioattività spontanea e sulle disintegrazioni artificiali della materia sono stati elaborati sul materiale raccolto ed esposto dai miei assistenti, il dr. P. Fadda e la sig. dr. Z. Ollano rispettivamente. L'ultimo capitolo è stato redatto di recente, quasi al momento stesso in cui è stata annunciata la scoperta della radioattività artificiale.

La diversità delle persone da cui è stata esposta la materia e le aggiunte fatte non pare tuttavia abbiano alterato quella unità di concezione che era nel programma delle conferenze primitive.

La raccolta che cosí viene presentata al pubblico vuol essere un riepilogo della fisica attuale.

Ma bisogna dire che riepilogare in senso stretto, cioè mettere un punto alla fine di un argomento, nella fisica è molto difficile. La fisica sembra non consentire da un po' di tempo in qua impostazioni narrative di tipo statico e puramente conclusivo.

La chiusura di un ciclo di ricerche è sempre in essa seguito dal formarsi immediato di una nuova onda di movimento. Un'onda in gene-

rale non normale, tranquilla, ma tumultuosa, violenta.

Limitare l'esposizione a quanto è riepilogabile veramente sarebbe quindi presentare una immagine falsa della disciplina a cui qui si vuol interessare il pubblico.

Per questo ai primi capitoli, contenenti argomenti che hanno raggiunto un relativo equilibrio, fanno seguito altri in cui si riassume materia in piena elaborazione.

Crediamo che la presente esposizione sia cosí riuscita una figurazione attuale e completa, della parte sostanziale di questa dottrina che periodicamente tocca la terra madre per risorgere subito, come Anteo, con novello vigore.

RITA BRUNETTI

Cagliari, Novembre 1935-XIV.

CAPITOLO I

GLI STRUMENTI DELLA FISICA MODERNA

Introduzione. I problemi della transizione fra ottocento e novecento. Lo spettroscopio ottico. Gli spettrografi pei raggi X. I corpuscoli e i loro spettrogrammi. La camera di condensazione. Le camere di ionizzazione (i contatori di fotoni e di particelle). I nuovi strumenti e la tecnica.

CON alcune conversazioni piane e schematiche noi vogliamo avvicinare un poco il profano che per gusto e cultura si interessa dei progressi della scienza, al pensiero e alla forma di attività che domina oggi in uno dei campi piú progrediti e vivi delle discipline naturali, quello della fisica.

Tratteremo quindi del dualismo delle concezioni odierne dell'energia radiante e dei corpuscoli che compongono la materia. Mostreremo come questi dualismi abbiano condotto a impostare in modo probabilistico la trattazione dei problemi fisici. Descriveremo in brevi linee sintetiche la struttura esterna dell'atomo e accenneremo agli sforzi che si compiono per investigarne la parte piú intima, il nucleo materiale. Dovremo dir qualche cosa circa la natura della radiazione penetrante, messa alla moda in questi ultimi anni nella scienza dall'americano MILLIKAN e sui giornali dalle ascensioni stratosferiche del belga PICCARD; e infine esporre i principî dell'ultima meravigliosa scoperta: quella della radioattività artificiale.

Ma non si può parlare dei resultati trascurando di illustrare i mezzi con cui questi resultati sono stati raggiunti. Se si facesse questo si correrebbe il rischio di non esser creduti o almeno si creerebbe l'impressione di raccontar cose in cui ha troppa parte la fantasia. Evitare di parere non ben documentati è tanto piú necessario in quanto quello che esporremo o non è sempre molto ortodosso, non è cioè conforme alle idee piú comuni relative all'energia e alla materia, oppure è molto, troppo nuovo.

Oramai non ci meravigliamo piú tanto della prodigiosa agilità con cui la fisica muta e corregge le sue concezioni o all'improvviso salta le barriere che si opponevano al suo progresso. Ma c'è stato davvero un momento in cui i classicisti dell'ottocento guardavano con sospetto e diffidenza, se non con bellicoso rancore, il novecentismo nascente della fisica moderna.

Bisogna invece difendere questo novecentismo e dimostrare che esso è piú razionale di quello architettonico, il quale risolve spesso sotto il luminoso e caldo cielo d'Italia, ricco di storia e tradizioni, problemi posti dalle nebbie e dallo squallido rigore nordico.

In questo primo capitolo ci proponiamo appunto di dare un'idea del valore e della potenza attuale dell'indagine fisica. Essa naturalmente si fonda sulle disposizioni di cui la fisica si serve nello sperimentare. Degli strumenti che affinano i sensi del fisico novecentista, che al-

largano e moltiplicano la sua capacità di percezione, ci occuperemo quindi in primo luogo.

Certo gli apparecchi e i congegni d'esperienza variano da ricerca a ricerca, da laboratorio a laboratorio. Essi però hanno un carattere comune e dominante in un determinato periodo per tutti i laboratori, perché esiste un carattere comune e dominante negli argomenti che di volta in volta interessano i ricercatori di tutto il mondo.

Per questo la storia degli strumenti di fisica coincide con la storia della fisica stessa. E un museo di strumenti, come quello per esempio che è stato raccolto e ordinato a Firenze, prima intorno alla Tribuna eretta in onore di GALILEO, e ora in altra sede piú vasta, è una rassegna piú viva e obbiettiva del metodo sperimentale italiano di qualunque libro compilato da un uomo.

I problemi della transizione fra ottocento e novecento.

La termodinamica e la dottrina dell'elettricità che si sono sviluppate durante il secolo scorso in costruzioni compatte e grandiose come il romano *Digesto,* riassumono le leggi relative alla società degli elementi di cui, secondo gli accertamenti della chimica, è costituita la materia: gli atomi e le molecole.

Appunto questi accertamenti indicavano al fisico la necessità di occuparsi ormai direttamente dei componenti elementari della mate-

ria, di studiare le norme che seguono gli individui, norme dalle quali dipendono le leggi di grande scala di cui trattano la termo e l'elettrodinamica.

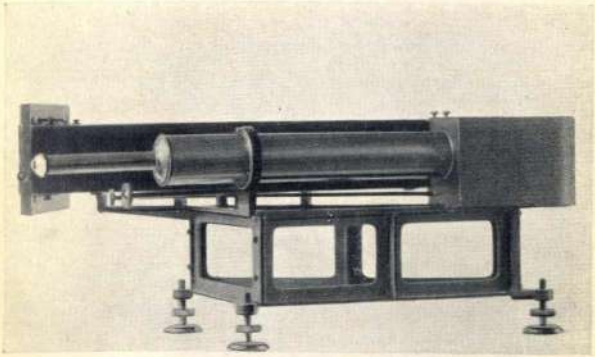
La curiosità e l'interesse del discendere dalle manifestazioni energetiche del macrocosmo ai meccanismi del microcosmo sono giustificati anche dal fatto che non poche delle leggi enunciate da queste dottrine, in apparenza perfette, cadono in difetto nelle condizioni d'eccezione realizzate alla fine dell'ottocento per cimentare la materia.

D'altra parte, se il comportamento della luce quando è lontana dalla sorgente che l'ha emessa è stato oggetto di profondo e ben elaborato studio nella prima metà dell'ottocento, al principio del novecento si conosce assai poco, per non dir nulla, di quello che avviene al momento della sua partenza e del suo arrivo sulla materia.

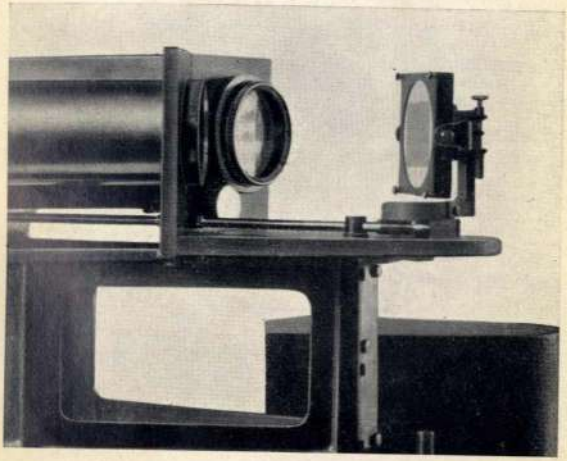
Si vanno poi alla fine dell'ottocento rivelando fatti nuovi; la espulsione spontanea o artificiale dalla materia di corpuscoli carichi, la eccitazione dei raggi X per bombardamento degli atomi con alcuni di questi corpuscoli.

Oltre le radiazioni elettromagnetiche ad alta frequenza, singolari messaggi vengono cioè lanciati al fisico ed egli deve affrettarsi a leggerli e interpretarli.

Bisogna dunque abbandonare il termometro e il calorimetro, altri congegni bisogna ideare oltre il galvanometro e l'elettrometro, per estendere i vecchi e aprire i nuovi campi di indagine.



a) Grande spettrografo ottico (Istituto Nazionale di Ottica).



b) Particolare del grande spettrografo: obbiettivi e reticolo.

Lo spettroscopio ottico.

Il primo problema che viene energicamente attaccato dal fisico del novecento è quello della emissione luminosa e per questa ragione lo strumento fondamentale della fisica diviene per molti anni lo spettroscopio nelle sue multiformi varietà.

Lo spettroscopio è stato in sostanza inventato da Isacco NEWTON, in tempi molto lontani. Nel primo libro della sua ottica si trova descritta la nota esperienza. Un foro praticato nell'impannata chiusa di una finestra lascia penetrare un raggio di sole. Questo viene fatto cadere su una delle faccie di un pezzo di vetro a sezione triangolare: il prisma. Sulla parete dirimpetto alla finestra invece del disco tondo e bianco, che si otterrebbe senza il prisma, si vede una striscia diversamente colorata da un estremo all'altro. Il rosso sta dalla parte dei raggi meno deviati; il violetto, dall'altra; in mezzo si trovano di seguito: giallo, verde, azzurro, indaco.

Il NEWTON riconosce subito che il fenomeno è dovuto al fatto che la luce solare è composta di luci di diverso colore e che ogni colore si separa dagli altri per la sua diversa refrangibilità nel vetro del prisma. Ce n'è abbastanza perché si formi e sviluppi la spettroscopia, cioè la dottrina della composizione della luce emessa dai corpi.

In quanto ha eseguito e riconosciuto il NEW-

TON è contenuto lo strumento di indagine e la giustificazione del suo uso. La riduzione del foro nella finestra a una fenditura lineare regolabile, l'aggiunta di due lenti (obbiettivi) atte a render il fascio che entra nel prisma parallelo e a focheggiarne poi le componenti separate su una lastra, sono semplici perfezionamenti tecnici (Fig. 1 e Tav. I, *a*).

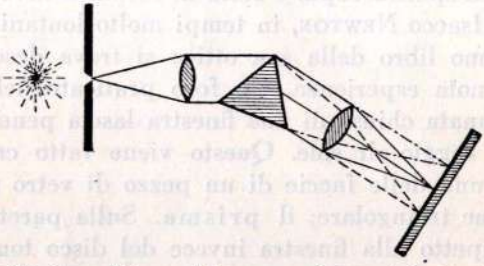


Fig. 1. — Schema del percorso dei raggi luminosi nello spettroscopio ottico. La sorgente illumina una fenditura, le cui immagini, diversamente colorate dopo il prisma, sono focheggiate su una lastra.

Tuttavia circa due secoli debbono passare prima che la spettroscopia prenda uno sviluppo continuativo e fruttifero. Il NEWTON, e per molti anni i suoi successori, non ebbero a disposizione che il sole o la fiamma della lucerna ad olio. La scintilla elettrica è stata un trastullo della fine del settecento. E, se non esistessero altre cause di principio, si potrebbe affermare che la spettroscopia non poteva nascere avanti per mancanza di materia prima da studiare.

Quando però all'inizio dell'ottocento l'idea della luce concepita come propagazione di oscillazioni si è ben stabilizzata, quando in seguito, oltre le fiamme alimentate da sostanze in combustione, si ebbe l'arco elettrico del DAVY acceso colle pile del VOLTA, e, per lo sviluppo della tecnica del vuoto, la scarica elettrica fu resa possibile in tubi contenenti aria o gas a bassa pressione, allora si è avviata l'analisi spettroscopica delle luci emesse dai corpi eccitati in condizioni svariate.

E si è constatato che i corpi incandescenti dànno tutti luogo a una successione continua di colori: che invece i gas o i vapori eccitati termicamente o per mezzo dell'elettricità presentano una successione di colori discontinua (Tav. II). In quest'ultimo caso se, al posto dell'oculare con cui si guarda il fenomeno, si pone una lastra fotografica, questa registra una successione di righe parallele disposte diversamente l'una rispetto all'altra a seconda della sorgente che le emette. La successione continua di colori o la serie di righe colorate costituiscono lo spettro delle radiazioni luminose dato dalle diverse sorgenti.

La spettroscopia raccoglie oltre le osservazioni fatte con lo spettroscopio, le leggi che da esse sono state dedotte.

Cosí oggi sappiamo che lo spettro continuo dei corpi incandescenti dipende dalla loro temperatura e solo in linea subordinata dalla loro composizione chimica (Cap. II).

L'astronomo, che dalla Terra fotografa lo spettro della luce emessa da una stella, può dedurre la temperatura della stella, come se la possedesse nel suo osservatorio.

Lo spettroscopio assume quindi le funzioni di un potente termometro.

Lo spettro discontinuo di ogni sostanza semplice o elemento dipende in parte dal modo di eccitazione. Tuttavia se l'eccitazione rimane la stessa, le sostanze semplici emettono spettri diversi, che le caratterizzano senza ambiguità. In seguito a eccitazione identica o confrontabile possiamo quindi riconoscere la natura dei corpi che vengono volatilizzati nella fiamma, nell'arco o nella scintilla. Possiamo distinguere per esempio il litio, che nella fiamma dà una riga rossa, dal sodio, che ne presenta due gialle; constatare come queste siano nettamente separate dalle righe gialle, che all'elio luminoso conferiscono una cosí viva colorazione. Traccie di sostanze che sfuggono ai metodi chimici sono rivelate dallo spettroscopio.

Lo spettroscopio è dunque anche un delicato e sicuro strumento d'analisi chimica.

Se davanti a una sorgente di luce continua, quale è il filamento di una lampada a incandescenza o il carbone di un arco voltaico, introduciamo un vapore o un gas eccitato, lo spettro continuo appare solcato da righe nere trasversali. Esse corrispondono alle righe che il gas o il vapore emettono. Cosí si ottiene lo spettro

d'assorbimento dei corpi, che serve a completare la loro analisi.

Molti corpi celesti sono incandescenti e circondati perennemente da vapori e gas luminosi. Il loro spettro continuo è solcato da numerose righe d'assorbimento che rivelano all'astrofisico la composizione chimica del sole e delle altre stelle, come se esse fossero saggiate nel laboratorio di chimica (Tav. II, *a*).

Molte proprietà degli atomi e delle molecole si possono dedurre dallo studio delle loro radiazioni luminose. Si può dire per esempio se il centro emettente è semplice o legato in molecola, se è neutro o se ha perduto cariche elettriche; si può anche contare il numero delle cariche elettriche negative elementari che esso ha perduto.

Con lo spettroscopio possiamo anche sapere se i centri luminosi sono fermi o in movimento e, quando si muovono, che velocità posseggono. La legge di cui si fa uso in questo caso è la stessa per cui un osservatore fermo lungo una strada ferrata sente il fischio della locomotiva piú acuto quando il treno arriva di quando esso è passato e si allontana (effetto Doppler). Il centro luminoso in moto appare diversamente colorato da quello che sta fermo; cioè sulla lastra fotografica si registra una riga spostata rispetto a quella che è propria dei centri in riposo. Dallo spostamento di questa riga si ricava con semplice calcolo la velocità del centro emettente.

Questo serve a riconoscere in laboratorio la velocità delle particelle luminose proiettate a

grande velocità nei tubi a vuoto. All'astrofisico questo ha dato modo di misurare la velocità di rotazione del Sole o dell'anello di Saturno e quella con cui si avvicinano o allontanano dalla Terra certi corpi celesti.

Le righe emesse da una sorgente che si trova sotto energiche azioni elettriche o magnetiche vengono profondamente modificate. La conoscenza di queste modificazioni permette a sua volta di rivelare la presenza di campi elettrici o magnetici. Quindi se il fisico da esse riconosce le azioni reciproche delle parti cui spetta l'emissione delle radiazioni, l'astrofisico per esse rivela ad esempio l'esistenza di potenti campi magnetici nelle cosí dette macchie solari. Rivela cioè che queste macchie sono come giganteschi conduttori avvolti a solenoide, percorsi da corrente elettrica diretta verso o contro la superficie del Sole.

I richiami alle applicazioni astrofisiche della spettroscopia, cioè a fenomeni che avvengono in un mondo cosí lontano dal laboratorio, sono suggestivi. I resultati relativi all'astronomia sono per lo piú controllabili coi calcoli condotti sui dati raccolti in secoli di osservazioni accurate. Essi quindi rendono meglio di ogni altra cosa il valore dello spettroscopio come strumento di indagine, mettono meglio di ogni altra cosa in rilievo la potenza di questa complessa arpa di vibrazioni, quando risolve le composizioni armoniche, che la natura esprime nelle sue luci e nelle sue ombre.

Lo spettroscopio a prisma di vetro non può servire per le radiazioni che stanno al di là del rosso o ultrarosse e per quelle che si estendono al di là del violetto o ultraviolette, perché il vetro non le lascia passare. Basta però sostituire al vetro il salgemma nel primo caso e il quarzo nel secondo.

Quando interessa conoscere strutture fini delle radiazioni lo spettroscopio a prisma deve esser munito di particolari disposizioni (gradinata del MICHELSON, lamina di LUMMER) oppure va abbandonato per un altro mezzo di dispersione della luce: il cosí detto reticolo. Esso consiste in una superficie piana o concava di metallo o vetro finemente striata mediante una macchina a dividere di precisione estrema (Tav. I, *b*; Cap. III).

Lo spettroscopio a prisma o a reticolo possono esplorare una gamma di radiazioni che sta fra 100 e 1000 bilioni di oscillazioni per secondo e possono rivelare differenze di frequenza nei casi piú fortunati di una vibrazione su cinquecentomila. Si noti che le frequenze acustiche sono dell'ordine di 1000 oscillazioni per secondo e che l'orecchio risolve due vibrazioni che differiscono di una unità.

Gli spettrografi pei raggi X.

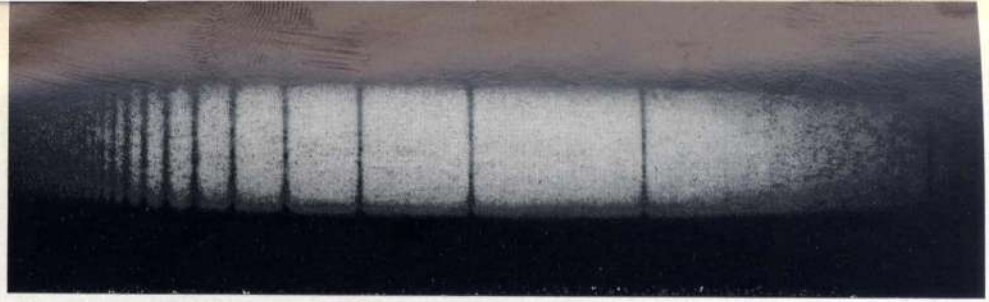
Nel 1913 la spettroscopia delle radiazioni ha esteso il suo campo d'azione. A quella data infatti è nato lo spettroscopio per radiazioni di un

trilione di vibrazioni per secondo. Di tale ordine di grandezza sono le oscillazioni dei raggi X, scoperti dal RÖNTGEN nel fatale anno 1895, che ha visto la scoperta del primo elemento radioattivo per opera dei CURIE e della radiotelegrafia del MARCONI.

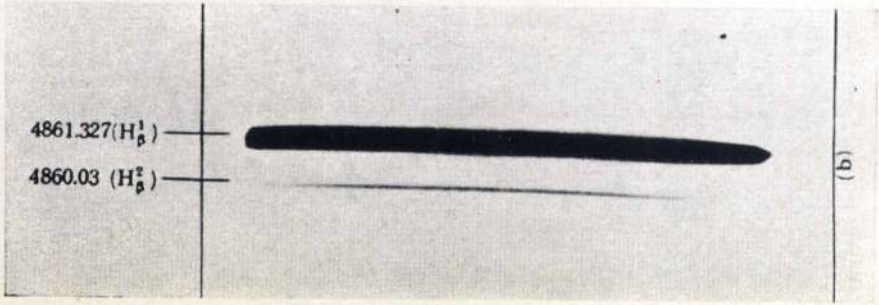
Questi raggi, che si ottengono lanciando un fascio di particelle negative (elettroni) contro un blocco metallico, hanno proprietà molto singolari. Essi passano con facilità attraverso alla materia a causa della loro elevata frequenza e modificano lo stato elettrico di atomi e molecole. Si sono perciò resi utili al clinico per le sue diagnosi e al medico per la cura di certe infermità.

Analizzare queste radiazioni con un prisma non si può perché esse non si rifrangono. Anche un reticolo ottico è poco adatto a diffrangerle e disperderle; occorre, per ottenere questo, un reticolo che non sia tracciato su vetro o metallo da una macchina guidata dall'uomo; ci vuole qualche cosa di piú minuto e perfetto, un reticolo che è stato disposto dalla divina mano della natura. Tale è un cristallo.

In esso gli atomi sono disposti ai vertici di poliedri elementari, cosí come ad esempio indica la figura *a* della tavola III rappresentante la struttura del cloruro di sodio o sal comune. Quando è attraversato o semplicemente colpito dai raggi X un cristallo li diffrange separandone le diverse frequenze (Cap. III). Esso può esser usato per la costruzione di uno spettroscopio pei raggi X (Fig. 2 e Tav. III, *b*).



a) Serie di Balmer dell'idrogeno in assorbimento (dalla stella β *Tauri*).



b) La riga azzurra dell'idrogeno a peso 1 (4861.327 A) e accanto ad essa la radiazione corrispondente dell'idrogeno a peso 2.

Gli spettrogrammi che si ottengono con questi spettroscopî, suggeriti dal LAUE e costruiti poi in forme diverse da varî autori, non differiscono per l'aspetto da quelli che si registrano con le radiazioni luminose (Tav. IV, *a*). Anche coi raggi

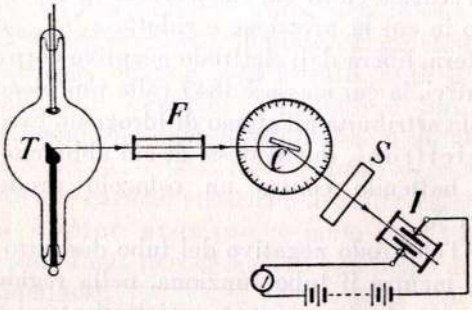


Fig. 2. — Schema di spettrografo per raggi X. Dal tubo che li genera *T*, i raggi X arrivano a due fenditure consecutive, *F*, e al cristallo *C*. Questo li diffrange e il fascio è allora raccolto dalla camera di ionizzazione oppure da una lastra fotografica. Nella figura *S* rappresenta uno strato assorbente posto sul cammino dei raggi per eventuali esperïenze di assorbimento.

X otteniamo spettro continuo e spettro discontinuo rappresentato da righe parallele e disposte in modo diverso a seconda dell'elemento da cui provengono. Esse caratterizzano cioè l'elemento che le produce, mentre lo spettro continuo dipende solo dalle condizioni di eccitazione, ossia dall'energia delle particelle usate a bombardare la materia.

I corpuscoli e i loro spettrogrammi.

Noi possediamo in laboratorio varie disposizioni atte a separare dalla materia e lanciare nello spazio corpuscoli carichi di elettricità.

La scarica elettrica, che avviene in un tubo di vetro in cui la pressione è ridotta a $^1/_{10\,000}$ di atmosfera, libera dall'elettrodo negativo corpuscoli negativi, la cui massa è 1845 volte piú piccola di quella attribuita all'atomo di idrogeno. Essi sono gli elettroni, quelli stessi di cui abbiamo detto che battendo contro un ostacolo producono raggi X.

Se l'elettrodo negativo del tubo descritto è forato, mentre il tubo funziona, nella regione ad esso retrostante, vengono proiettati atomi o molecole del gas residuo carichi di elettricità positiva. Essi costituiscono i cosí detti raggi positivi o del canale.

Molti altri procedimenti possiamo utilizzare per produrre elettroni piú o meno veloci, altri modi sono stati inventati per imprimere movimento a frammenti di materia dotati di carica elettrica (Cap. VII).

Inoltre certe sostanze semplici, le radioattive, espellono spontaneamente raggi *beta* cioè elettroni velocissimi, ovvero atomi di elio con due cariche positive elementari (raggi *alfa*). Nei cosí detti processi di disintegrazione artificiale della materia (Cap. VII) gli atomi leggeri possono essere scomposti in parti, di cui una spesso

è costituita come un atomo di idrogeno con una sola carica positiva; essa prende il nome di protone.

Delle masse e delle velocità di queste particelle la spettroscopia ottica non sempre dice abbastanza e sempre lo fa con grande difficoltà. Spesso poi non può dire nulla, perché essa non ha potere sui corpi non luminosi. E gli elettroni per esempio, quando sono estratti dagli atomi, perdono ogni capacità di emettere luce; la riacquistano solo quando ritornano su un atomo o una molecola. A sua volta l'atomo privato di tutte le sue cariche elettriche negative esteriori, cioè il nucleo atomico, è muto per la spettroscopia ottica, perché non dà piú luogo a processi luminosi.

Il nucleo emette bensí talvolta raggi *gamma*, che sono raggi X di frequenza in media piú elevata di quella dei raggi X della tecnica ordinaria. La spettroscopia delle alte frequenze può quindi esser utile allo studio del nucleo. Purtroppo essa fin qui ha reso poco per difficoltà tecniche dipendenti dall'eccessiva penetrazione e la piccola intensità di queste radiazioni (Capitolo VI).

Gli elettroni in moto, i nuclei atomici, cosí come tutte le altre possibili proiezioni di particelle materiali dotate di carica elettrica, debbono quindi esser studiate in modo speciale.

È giocoforza abbandonare lo spettroscopio di frequenze proprie dei raggi luminosi e inventare una nuova spettroscopia che convenga

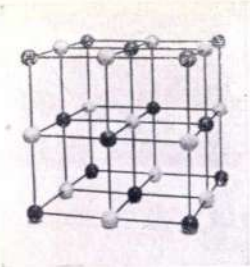
all'analisi delle cariche, delle masse e delle velocità dei raggi corpuscolari.

Abbiamo visto che per noi spettro ottico o di radiazioni in generale significa una successione di traccie lineari parallele su una lastra fotografica o nel campo di visione di un oculare, rappresentanti con la loro posizione reciproca le diverse frequenze della vibrazione luminosa. Per analogia, se su una lastra fotografica registriamo traccie lineari parallele prodotte da particelle di ugual massa e ugual carica elettrica, ma diversa velocità, avremo uno spettro di velocità. Se su una lastra registriamo traccie lineari parallele dovute a particelle di ugual carica elettrica e massa diversa, avremo uno spettro di massa. Quando le traccie che otteniamo corrispondano a individui con diverso momento magnetico, avremo uno spettro di momenti magnetici e cosí via.

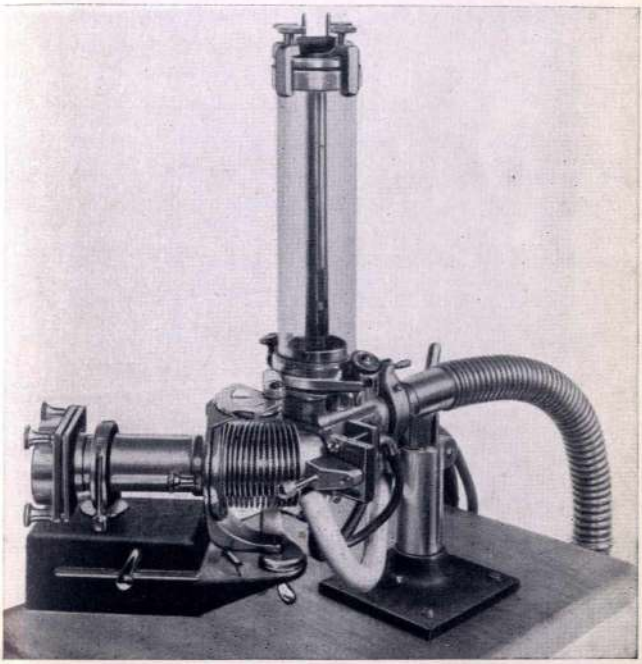
Per ottenere spettri di velocità e di massa — quelli che piú ci interessano — occorrono disposizioni differenti dallo spettroscopio ottico.

Per la registrazione possiamo sempre ricorrere alla lastra sensibile, perché il bromuro d'argento contenuto nella sua gelatina si altera e dà luogo a immagini latenti, che possono esser sviluppate nei modi noti, sia che venga colpito dalla luce, sia che venga bombardato da particelle fornite di energia cinetica sufficiente.

Ma il principio di dispersione non può rimanere lo stesso che per la luce. La rifrazione e la diffrazione non si prestano alla separazione di



a) Salgemma (NaCl). Nella prima figura le palle bianche rappresentano Na^+ (o Cl^-) le nere Cl^- (o Na^+). La struttura del cristallo è cubica. Nella seconda figura lo stesso cristallo è rappresentato con sfere a contatto per indicare la regione approssimativa occupata da ogni ione nella struttura cristallina. Anche qui sfere nere Na^+ e bianche Cl^-.



b) Spettrografo a vuoto connesso al tubo per la produzione di raggi X molli (secondo SEEMANN).

corpuscoli, come si prestano alla separazione delle frequenze luminose o dei raggi X. La fisica non ha tuttavia da andare molto lontano per procurarsi la disposizione adatta a disperdere i centri dotati di cariche elettriche diverse, i quali si presentano per lo piú animati di moto rettilineo e velocità considerevole. Alla dispersione delle cariche elettriche in movimento si riduce infatti il problema da risolvere.

I principî su cui si fondano i nuovi spettrografi di velocità e di massa sono in fondo le azioni attrattive e repulsive fra corpi elettrizzati, oppure quello stesso per cui girano i motori a corrente continua o alternata, vale a dire l'azione del campo magnetico su un conduttore percorso da corrente elettrica.

Una particella, positiva per esempio, che penetra nello spazio compreso fra due lastre di metallo cariche l'una di elettricità positiva e l'altra di elettricità negativa viene attratta da questa e respinta dalla prima. Essa cioè cade sulla lastra negativa, se non ha velocità propria; ma se si sposta in assenza del campo con moto uniforme, percorre nel campo una traiettoria eguale a quella di un proiettile che esce dalla bocca del fucile, cioè un arco di parabola.

Essa pertanto devia dalla linea retta su cui era avviata e tanto piú quanto piú forte è l'azione elettrica a cui è sottoposta; a parità di campo tanto piú è deviata quanto piú piccola è la sua velocità e quanto piú piccola è la sua massa. Un fascio di particelle a diversa massa,

e carica e velocità identiche, esce quindi dal campo elettrico scisso nei suoi componenti di diversa massa.

Un corpuscolo positivo, che è proiettato in linea retta o lanciato su una curva, equivale a un conduttore percorso da corrente elettrica nello stesso senso del moto del corpuscolo e avente la forma della sua traiettoria. Se un conduttore di tal fatta viene introdotto fra i poli di un'elettrocalamita, esso si sposta nella direzione ortogonale alla direzione delle linee di forza del campo. Cosí fa pure il corpuscolo positivo che attraversa il campo magnetico. Anche in questo caso lo spostamento della particella dalla sua traiettoria normale dipende dall'intensità del campo, ma a parità di questo è tanto maggiore quanto piú lenta è la particella, piú piccola è la sua massa e piú alto il valore della sua carica elettrica.

Gli spettrografi di velocità e di massa vengono costruiti con il solo campo elettrico, col solo campo magnetico o con tutti e due combinati insieme. La semplice disposizione della figura 3 è stata ideata dal DE BROGLIE e serve a ottenere gli spettri di velocità delle cariche elettriche negative elementari. Con essa il DE BROGLIE stesso ha registrato con elettroni atomici spettri simili a quelli della tavola IV, *b*. Le righe separate corrispondono a gruppi di velocità molto diversa, e ognuna di esse è larga e diffusa, perché le particelle dei singoli gruppi non hanno velocità perfettamente identica.

Con disposizioni analoghe sono stati ottenuti gli spettri di nuclei di elio che hanno massa 4 e due cariche positive (Tav. IV, *c*).

Mediante una conveniente combinazione dei due campi, elettrico e magnetico, J. J. THOMSON

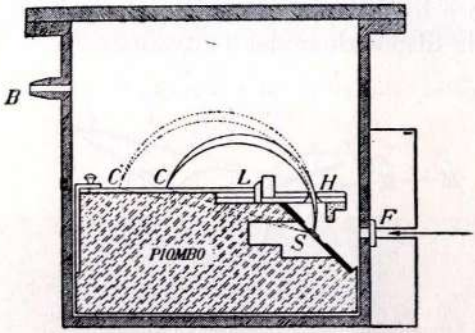


Fig. 3. — Disposizione del DE BROGLIE per gli spettri di velocità di elettroni, liberati dai raggi X. Questi, penetrando nella cassetta attraverso il foro *F*, colpiscono il materiale posto in *S*. Gli elettroni fotoelettrici che cosí si formano dal campo magnetico (ortogonale al piano del foglio) sono diretti alla fenditura *H* e curvati verso la lastra *L* in *C* o *C'*. S'intende che nella cassetta in cui questo avviene, attraverso alla bocca *B*, viene fatto il vuoto.

per la prima volta ha messo in evidenza che il neon conosciuto dai chimici è composto di atomi a peso diverso.

Il THOMSON usava campi elettrico e magnetico sovrapposti e a linee di forza parallele. Le particelle di ugual massa e diversa velocità si di-

spongono in questo modo lungo archi di parabola (Tav. V, *b*).

F. W. Aston con campi disposti successivamente e a linee di forza incrociate (Fig. 4) ha fatto in modo che le particelle di velocità diversa e ugual massa si focheggiassero in unico punto e ha reso quindi piú luminosa, per cosí dire, la disposizione del Thomson.

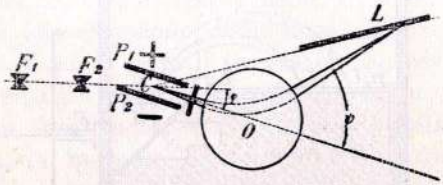
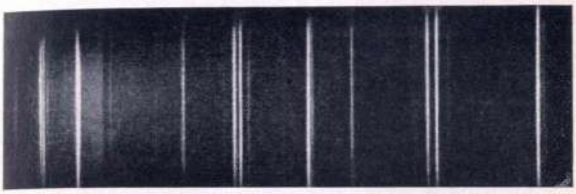


Fig. 4. — Disposizione schematica dello spettrografo di massa ideato da Aston. Gli ioni di ugual massa e ugual carica dopo aver traversato le fenditure F_1 ed F_2 sono deviati nel campo elettrico P_1 P_2 e dal campo magnetico con centro in O concentrati sulla lastra L anche se hanno inizialmente diversa velocità.

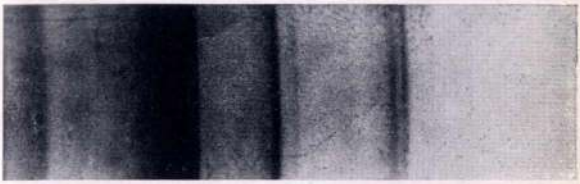
L'Aston cosí ha dimostrato che quasi tutti gli elementi che si considerano semplici nella chimica non sono tali, ma resultano dalla miscela di atomi a diverso peso. Questo si legge nei cosí detti spettrogrammi di massa di cui la tavola V, *a*, dà un esempio. In essa si vede fra altro che il litio, che pel chimico pesa 6,94 unità, pel fisico è fatto di due individui, uno a peso 6 e l'altro a peso 7 mescolati in diversa proporzione.

Cosí, dopo poco tempo che il fatto era stato

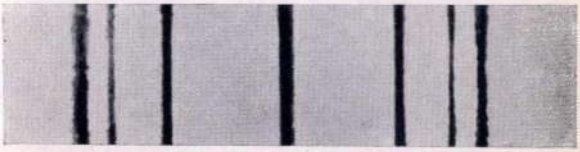
1° ord. 2° ord. 3° ord.



a) Spettro X del platino (L) in tre ordini successivi (H. SEEMANN).



b) Spettro di velocità per elettroni ottenuti da argento eccitato con la riga K del tungsteno (M. DE BROGLIE).



c) Spettro di velocità di particelle α ottenuto con campo elettrico (E. RUTHERFORD).

segnalato mediante osservazioni allo spettroscopio ottico da UREY, BRICKWEDDE e MURPHY (Tav. II, *b*) col metodo del THOMSON perfezionato, varî autori hanno confermato che uno su 4000 atomi di idrogeno non pesa 1 unità, ma il doppio (Tav. V, *c*).

Il nuovo idrogeno non è naturalmente da confondere con la molecola dell'idrogeno che pesa pure due unità, perché questa contiene due elettroni, mentre l'idrogeno atomico a peso 2 ne contiene uno solo, come l'altro.

Oramai si sta facendo conoscenza anche con un idrogeno a peso 3 (Cap. VII).

Il peso dei nuovi atomi messi in evidenza dall'ASTON e che prendono il nome di isotopi (Cap. IX), è dato dallo spettrografo di massa con la precisione di 1 su 10 000.

Si vede cosí che lo spettrografo che nella vecchia forma è stato un termometro, o ha sostituito la provetta del chimico, nella forma nuova è divenuto un misuratore di velocità per omologare i primati battuti nelle loro corse dalle particelle elettrizzate e insieme una bilancia, la cui sensibilità supera tutte le sensibilità immaginabili da un perfetto costruttore.

La camera di condensazione.

Gli spettrografi di velocità e di massa che hanno reso servigi incalcolabili alla fisica dell'atomo sono oggi adibiti allo studio del nucleo. Ma a questo studio serve in modo particolare

un'altra bellissima disposizione ideata nel 1913 da C. WILSON per vedere le particelle in moto.

Non possiamo vedere atomi o elettroni al microscopio, perché sono troppo piccoli. Li guardiamo e vediamo invece press'a poco come guardiamo e vediamo il percorso di un treno che viaggia nascosto dietro un'alta siepe: osservando il fumo che la sua locomotiva lascia dietro di sé. Li vediamo cioè nella traccia della loro traiettoria.

Quando una particella traversa a gran velocità un gas essa compie sulla sua strada una serie di disastri: rompe molecole, ne stacca cariche elettriche, in una parola: ionizza il gas. Ora esiste un fatto molto interessante. Se avviene una variazione di pressione in aria o in altro gas umido, il vapor d'acqua si condensa e si condensa di preferenza sulle particelle cariche. La cosa si dimostra facilmente. Si abbassi bruscamente la pressione sotto una campana pneumatica dopo avervi acceso un fiammifero; si vedrà formarsi la nebbia. Quando il fiammifero non è intervenuto a portare nell'aria sotto la campana il suo contributo di centri carichi, la nebbia non è cosí evidente.

La presenza di centri carichi trasportati dal fumo dei camini delle fabbriche nelle città nordiche industriali spiega la persistenza e la diffusione delle nebbie in tali città. C'è stato una volta chi in base a questo principio ha sperato di far piovere producendo condensazioni artifi-

ciali negli strati atmosferici meno alti con lo sparare contro di essi cannonate a salve.

Ora se il gas è ionizzato solo lungo una linea sottile, la condensazione ha luogo solo lungo questa linea, ed essa, sotto un'intensa illumina-

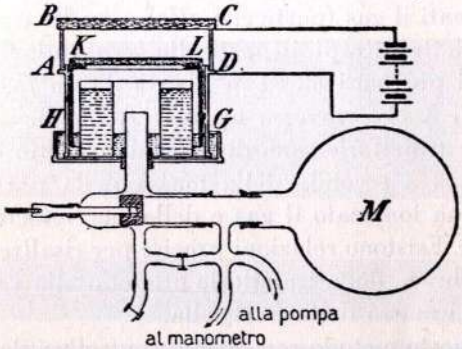


Fig. 5. — Schema originale della camera di condensazione del WILSON. *ABCD* è una cameretta di vetro il cui volume può essere ridotto dallo spostamento del cilindro *HKLG*. Questo si fa comprimendo il gas sottostante. L'espansione avviene quando si mette in comunicazione l'ambiente posto al disotto del cilindro mobile con il pallone *M* in cui la pressione è stata opportunamente ridotta.

zione, apparirà come un filo bianco su campo oscuro.

La figura 5 dice come è fatto l'apparecchio che serve a ottenere questo resultato. Sostanzialmente si tratta di uno stantuffo che si muove entro un cilindro, di cui il fondo posto in alto è trasparente. Un conveniente rapido abbassa-

mento di questo stantuffo è sufficiente a creare le condizioni di condensazione nella cameretta superiore. Allora con una macchina fotografica semplice o stereoscopica si può fotografare le traccie di nebbia prodottesi. E si registreranno cosí le traccie o di particelle di elio veloci percorrenti il gas (particelle *alfa*) o quelle prodotte da elettroni rapidi (particelle *beta*) o dagli elettroni piú lenti messi in libertà da un fascio di raggi X che traversa un gas (Tav. VI).

Le traiettorie sono diverse per aspetto e lunghezza a seconda della massa della particella che ha ionizzato il gas e della sua velocità iniziale. Esistono relazioni precise per risalire dalla lunghezza della traiettoria ottenuta alla velocità e alla massa della particella.

Questo metodo completa e controlla i dati che si ricavano cogli spettrografi di velocità e di massa.

Le camere di ionizzazione (i contatori di fotoni e di particelle).

Spesso occorre contare le particelle emesse spontaneamente o artificialmente dai corpi. Possiamo in certi casi contarle facendole battere sopra uno schermo fluorescente, ma possiamo anche farle arrivare entro un recipiente metallico, opportunamente caricato di elettricità e contenente un gas a pressione alta, normale o bassa secondo la convenienza.

Nel primo caso col microscopio si vede sullo schermo un puntino luminoso là dove la particella ha colpito (scintillazione). Il metodo è utile quando si debbano contare particelle materiali proiettate contro lo schermo con notevole energia (spintariscopio).

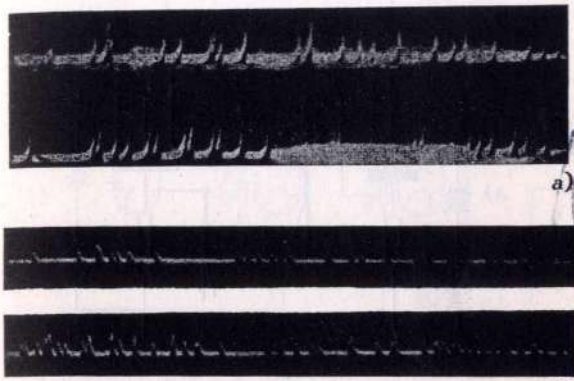


Fig. 6. — Oscillogrammi: *a*) di particelle β (sopra) o α (sotto) ottenuti con contatore a punta, *b*) di particelle ottenuti con contatore a filo. (E. RUTHERFORD, J. CHADWICK, C. D. ELLIS: *Radiations from Radioactive Substances*, plate 1.)

Nel secondo caso ogni particella che vien ricevuta produce ionizzazione del gas, come nella camera del WILSON. Il gas non ionizzato era un cattivo conduttore, ma appena esso contiene dei centri carichi di segno opposto si trasforma in un conduttore. Se quindi fra la parete del recipiente in cui si trova e un altro elettrodo si stabilisce una conveniente differenza di poten-

ziale, al momento della ionizzazione si ha una corrente elettrica rivelabile con un elettrometro o un galvanometro. Le deviazioni degli equipaggi di tali strumenti potranno con semplice artificio ottico esser registrate sopra una film scorrente a velocità nota. Si otterranno cosí dei grafici come quelli che presenta la figura 6, *a*, *b*

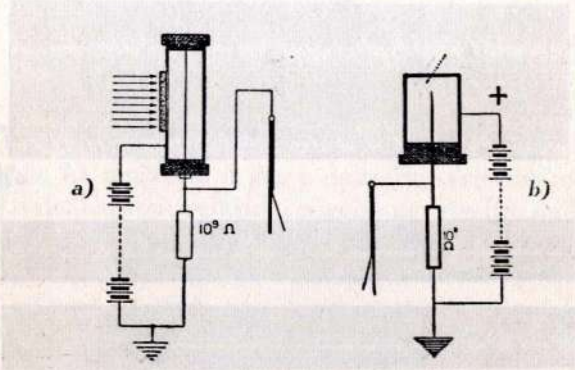


Fig. 7. — *a*) Disposizione per un contatore a filo di GEIGER e MÜLLER; *b*) Disposizione per un contatore a punta.

e che corrispondono a ionizzazione del gas prodotta da particelle dotate di massa come quella dell'elio (raggi α) ed a particelle dotate di massa 1845 volte piú piccola di quella dell'idrogeno (raggi β).

Nomi particolari possono assumere le camere di ionizzazione dalla forma del loro elettrodo centrale; si ha cosí il contatore a filo di GEIGER e MÜLLER (Fig. 7, *a*) e il contatore a

punta o a palla di GEIGER e KLEMPERER (Fig. 7, *b*).

Il primo serve per contare elettroni veloci o i quanti che li liberano. Il secondo si adatta meglio a rivelare corpuscoli materiali.

Le correnti che si ottengono con le camere di ionizzazione sono spesso troppo deboli e occorre amplificarle. La tecnica degli amplificatori a

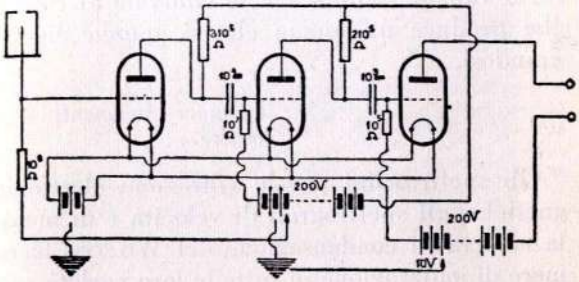


Fig. 8. — Esempio di circuito amplificatore per contatori a punta.

valvole termoioniche, nota ai radioamatori, è allora posta a contributo (Fig. 8). La corrente di ionizzazione della particella che traversa la cameretta di ionizzazione o il contatore si traduce in impulsi di corrente, che percorrono il circuito di un altoparlante, e quindi in suono.

Or è qualche anno è stato annunciato dai quotidiani che in America una certa sera sarebbe stato radiodiffuso il rumore emesso da un atomo che si rompe. Non c'è bisogno di andare in America per assistere a certi trucchi.

Un altoparlante, collegato mediante un amplificatore a un contatore a filo di GEIGER e MÜLLER, posto in presenza di un debole preparato radioattivo, dà luogo a una ben nutrita fucileria. Sono i raggi *gamma* emessi dal preparato che producono le scariche nel contatore a filo ed è il rumore di queste scariche che noi sentiamo. Ora i raggi *gamma* sono la conseguenza della disintegrazione di un atomo di radio. Per questo il rumore delle scariche equivale al rumore che produce un atomo che si spezza disintegrandosi.

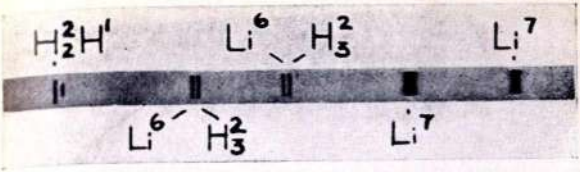
I nuovi strumenti e la tecnica.

Gli spettroscopi per le vibrazioni elettromagnetiche, gli spettrografi di velocità e di massa, la camera di condensazione del WILSON, le camere di ionizzazione in tutte le loro varietà sono gli strumenti di moda nella fisica del novecento.

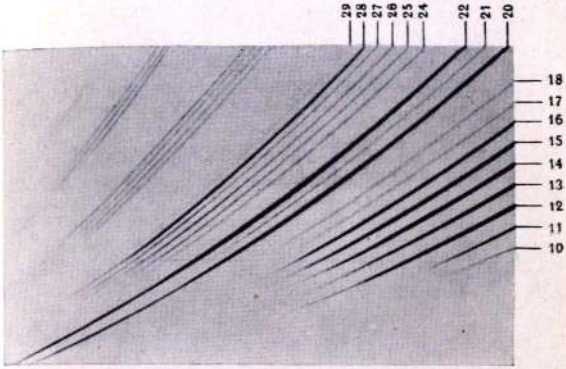
Durante l'ottocento la fisica usava il galvanometro e l'elettrometro, il microscopio, il calorimetro; i congegni per cui piú si è distinta sono: la dinamo, il motore, la stazione radioemittente.

Cosa vuol dire questo? che gli strumenti dell'ottocento sono fuori uso e stanno negli scaffali a prender polvere o ad aspettare di assumere dignità di cimeli?

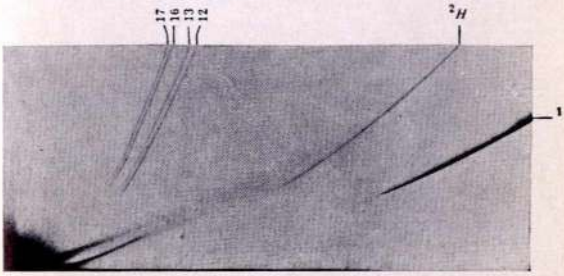
No; questi strumenti completano l'armamentario di cui si vale il fisico moderno. Questo diviene ogni giorno piú complicato perché i vecchi strumenti sussidiano l'uso dei nuovi.



a) Spettro di massa di Li_6 e Li_7 (K. T. Bainbridge).



b) Parabole tipo Thomson in cui sono da notare quelle prodotte da tre isotopi del neon (indicate con 20, 21, 22). Notare la diversa intensità delle tracce.



c) Parabole prodotte da ioni di idrogeno a peso 1 e a peso 2.

Il novecento artistico disprezza e rifiuta i prodotti del suo ottocento. Il novecento strumentale fisico ammira e considera come prezioso acquisto quanto gli è stato fornito dall'opera e dall'ingegno ottocenteschi.

A differenza degli apparecchi dell'ottocento, quelli novecenteschi sono per lo piú allo stadio di disposizioni che il fisico deve combinare con le proprie mani e non di cose commerciali, costruite in serie, e che si possono acquistare quando si ha la fortuna di venire in possesso della somma conveniente.

Anche per gli altri strumenti, quelli concreti, definitivi dell'ottocento è esistito un momento in cui erano nelle stesse condizioni degli attuali. Il galvanometro per esempio è stato prima un "gesto" di AMPÈRE; egli ha avvicinato a un ago calamitato mobile un filo percorso da corrente elettrica e lo ha visto deviare. La legge che AMPÈRE ha dedotto dallo studio di queste deviazioni ha mostrato che la disposizione poteva servire a misurare l'intensità della corrente elettrica percorrente un conduttore. Cosí si è avuto successivamente il moltiplicatore di SCHWEIGGER e via via le forme piú perfezionate che portano i nomi di NOBILI, D'ARSONVAL, THOMSON, ecc.

Al galvanometro è stata aggiunta una resistenza in serie ed è divenuto un misuratore di tensioni: il voltmetro; una resistenza in derivazione lo ha trasformato in un amperometro. Sotto queste forme esso sta appeso ai qua-

dri di distribuzione e comando di tutti gli impianti elettrici, sta nell'automobile, o in tasca al radioamatore.

A cosa potranno servire fuori del laboratorio le camere del WILSON e i contatori a punta e a filo? Non potrei oggi rispondere direttamente, ma posso riferirmi a un'altra disposizione che coi contatori di GEIGER e MÜLLER e di GEIGER e KLEMPERER ha qualche parentela di funzionamento: la cella fotoelettrica. Nel 1880 il LENARD si accorgeva che la luce estrae dai corpi cariche elettriche negative; nel 1906 l'EINSTEIN formulava la legge che regola questa estrazione. Nasce la cella fotoelettrica che serve prima in laboratorio a misure obbiettive di intensità luminosa. Con la cella fotoelettrica si va oggi sostituendo il cane da guardia e si comandano a distanza le serrature di porte e cancelli. Oggi le proprietà singolari di questo semplice strumento ci procura la gioia del cinema sonoro, ci darà presto la radiovisione a domicilio.

Per quanto riguarda lo spettroscopio ottico e quello dei raggi X posso affermare che essi sono già discesi dalle loro altezze speculative e, passando attraverso al laboratorio di chimica, sono entrati nella fabbrica per l'esame della purezza dei prodotti chimici e la conoscenza della struttura delle leghe metalliche.

E lo spettrografo di velocità non è in sostanza l'oscillografo catodico di cui l'elettrotecnica fa uso per analizzare la forma delle correnti?

Eppure né AMPÈRE quando studiava le proprietà delle correnti elettriche che percorrevano i conduttori ha pensato al voltmetro e all'amperometro; né LENARD né EINSTEIN quando indagavano l'effetto fotoelettrico pensavano alle applicazioni della cella relativa. E NEWTON, il grande filosofo, quando eseguiva le sue esperienze col prisma, non aveva nemmeno idea di cosa fosse la luce.

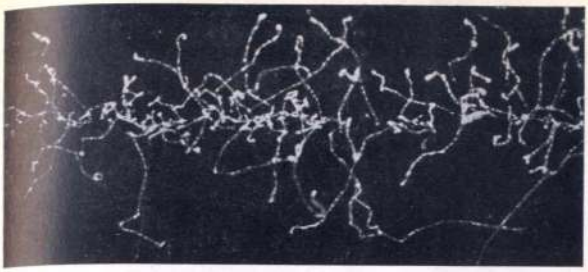
La transizione fra la disposizione che ha scopo speculativo e lo strumento utile alla pratica richiede spesso molto tempo, ma tale transizione è spontanea, è fatale. Il processo di utilizzazione delle idee scientifiche è un processo naturale, che non è suscettibile di esser forzato o costretto, come non si forzano e non si costringono gli avvenimenti della storia.

Tutt'al piú si potrà accelerare lo sviluppo di questo processo intensificando il lavoro di laboratorio. Ma appena la ricerca scientifica ha raggiunto il conveniente grado di maturità si può star sicuri che il tecnico abile, l'inventore geniale se ne accorgono e afferrano l'occasione per lanciare sul mercato lo strumento che risolve uno dei problemi tecnici imposti dalla vita umana.

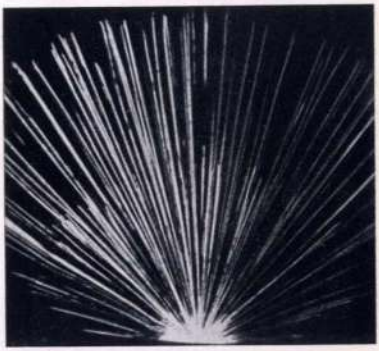
Quasi con ansietà indiscreta il fisico si sente spesso domandare a cosa servono i suoi studi e temo che talvolta si pretenda che il giovane che traversa le aule universitarie ne esca con la mentalità di un capo officina.

Per il bene del progresso tecnico stesso noi dobbiamo conservare al laboratorio di fisica il suo carattere di sede in cui si sviluppa la pura speculazione, dove si agitano ed alimentano le idee. Nel laboratorio di fisica sperimentale si deve fare della filosofia naturale.

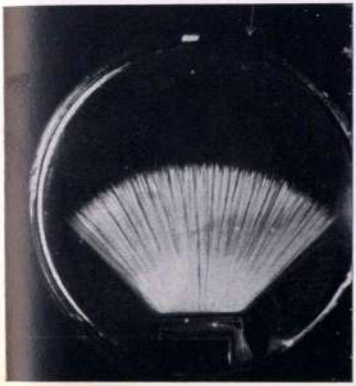
Quella filosofia però che sa mantenere spontaneamente il contatto con la vita e che ha dato al mondo la dinamo del PACINOTTI, il motore di Galileo FERRARIS, la radio del MARCONI.



a) Ionizzazione dell'aria prodotta da raggi X; le traccie sono dovute agli elettroni che essi liberano dal gas.



b) Traiettorie di raggi α emessi da ThB + C + C'. Si notano due gruppi di raggi di lunghezza diversa.



c) Raggi α emessi da ThB + C + C' con un raggio H^+ (L. Meitner e K. Freitag).

CAPITOLO II

IL DUALISMO DELL'ENERGIA RADIANTE

Il dualismo nella propagazione della luce. Il dualismo nell'emissione della luce. L'ipotesi del PLANCK *(i quanti). L'effetto fotoelettrico. L'effetto Compton. Relazione fra i dualismi della luce.*

QUANDO, fra il 1666 e il 1669, Isacco NEWTON, con un prisma acquistato per pochi soldi a Cambridge, eseguí le famose esperienze sulla dispersione della luce solare, non sapeva cosa fosse la luce. O meglio, egli credeva di saperlo, perché, come i Greci e il vecchio EUCLIDE, riteneva che i corpi luminosi emettessero particelle *sui generis*. Queste bombardando l'occhio davano luogo alla percezione luminosa.

Da quelle esperienze egli dedusse che la luce bianca è composta di diversi colori e che a ogni colore corrisponde una diversa refrangibilità nel vetro (Cap. I).

Il dualismo nella propagazione della luce.

Finché si conosce solo il fenomeno della rifrazione della luce che passa da un mezzo a un altro, l'ipotesi della emissione dei Greci e di NEWTON si regge tollerabilmente. Basta ammettere che la velocità delle particelle nell'acqua, per esempio, sia superiore a quella nell'aria.

Supponiamo infatti che, al momento della transizione del corpuscolo luminoso da un mezzo

a un altro, per ragioni di simmetria, si conservi la componente della velocità parallela alla superficie di separazione. Come si vede dalla figura 9, ne segue un aumento della velocità della particella nel secondo mezzo, se questo è piú rifrangente del primo, cioè se il raggio luminoso in esso si accosta alla normale.

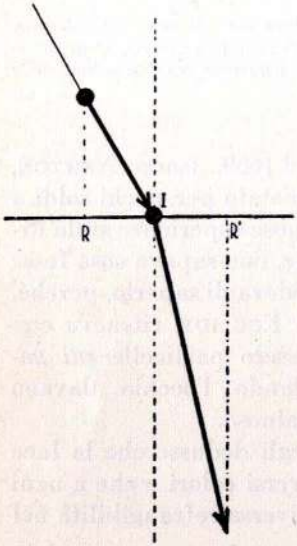


Fig. 9. — Schema della rifrazione secondo la vecchia teoria dell'emissione della luce. *RI* rappresenta la componente della velocità della luce (freccia) prima di penetrare nell'acqua; $IR' = RI$ quella dopo la penetrazione.

Ora la cosa non è vera, ma per molto tempo non si è saputo che non era vera. Il primo tentativo di misurare la velocità della luce è stato fatto da GALILEO. Ma, come aveva già intuito LEONARDO DA VINCI, la luce si propaga piú rapidamente del suono, « la luce è rapida come il pensiero ». E si capisce che i mezzi di cui poteva disporre GALILEO GALILEI per valutare l'esiguo intervallo di tempo con cui la luce percorre la distanza fra due colline vicine, erano inadeguati. Per misurare

una velocità dell'ordine di migliaia di chilometri al secondo occorrono basi astronomiche o artifici complicati.

Nel 1675 Olaf RÖMER dal periodo d'eclisse di uno dei satelliti di Giove dedusse che la luce nell'aria ha velocità finita e precisamente di circa 300 000 km al secondo. Piú tardi, nel 1727, Giacomo BRADLEY con lo studio dell'aberrazione delle stelle fisse arrivò a ugual resultato. Ma si trattava di misure di velocità negli spazi cosmici e nell'atmosfera terrestre. Molto tempo doveva passare perché si realizzassero i mezzi non solo di perfezionare questi metodi, ma di determinare la velocità della luce nell'acqua.

La teoria dell'emissione poteva quindi da questo punto di vista stare tranquilla per molto tempo.

Esisteva però ai tempi stessi in cui viveva il NEWTON un altro punto di vista relativamente al processo luminoso che doveva invece disturbare la pace della teoria dell'emissione, insieme con quella del grande filosofo naturale.

Un frate italiano, vissuto fra il 1618 e il 1663, Francesco Maria GRIMALDI, aveva già detto nella sua *Physico-Mathesis de Lumine Coloribus et Iride* (1665) che « la differenza dei colori della luce è causata da una differenza nella natura e nella velocità del movimento. Il movimento è una ondulazione. I colori sono dunque la luce stessa. »

La teoria dell'ondulazione era accettata al tempo di NEWTON dall'olandese Cristiano HUYGHENS e dall'inglese Roberto HOOKE, per non

citare che le figure piú significative per noi. Quest'ultimo aveva nel 1672 fatto conoscere all'Accademia delle Scienze di Londra un suo studio sui colori delle bolle di sapone e lo aveva esteso ai colori presentati da lamine sottili di mica o formati dallo strato d'aria compresso fra due vetri piani aderenti l'uno all'altro.

Isacco NEWTON riprendendo la sua ricerca sui colori della luce eseguí un'esperienza che ancora oggi viene ripetuta in iscuola e che porta il nome di anelli del NEWTON. Una lente a piccola curvatura è posta su una lastra piana di vetro. Un fascio parallelo di luce bianca la colpisce sotto un certo angolo. Nella direzione della riflessione si vede una serie di anelli colorati piú o meno regolari a seconda della regolarità della lente e del piano sottostante. Essi sono concentrici e di raggio crescente dal punto di contatto delle due superficie verso l'esterno, dove la distanza fra di esse cresce con continuità (Fig. 10).

Anche se Roberto BOYLE, come pare, ha eseguito prima del NEWTON quest'esperienza, egli non ne ha tratto molto frutto. Il NEWTON, miglior osservatore, viene colpito dall'evidente periodicità del fenomeno che si produce. Riconosce che gli anelli, in cui il violetto vien prima del rosso sono una cosa ben diversa dalla successione di colori ottenuta dal prisma. Tuttavia egli, che sembrava alla soglia di identificare i colori della luce con la frequenza di un moto ondulatorio, perché già nel 1672 aveva scritto: « se con qual-

che mezzo si separano l'una dall'altra queste vibrazioni, la piú grande dà una sensazione di rosso e la piú piccola quella di violetto profondo » egli, invece, si ostina a rimaner fedele all'ipotesi dell'emissione. Cosí deve fare sforzi immani per attribuire alle particelle luminose proprietà convenienti a spiegare gli anelli oscuri e luminosi della sua ultima esperienza.

La divisa scientifica di Isacco NEWTON era *"hypotheses non fingo"*, ma in questo caso non si può dire che egli l'abbia molto rispettata. Quello che è peggio si è che anche i sostenitori della teoria delle ondulazioni, HOOKE per primo, non capirono nulla della esperienza degli anelli, come non avevano capito nulla dei colori presentati dalle lamine sottili.

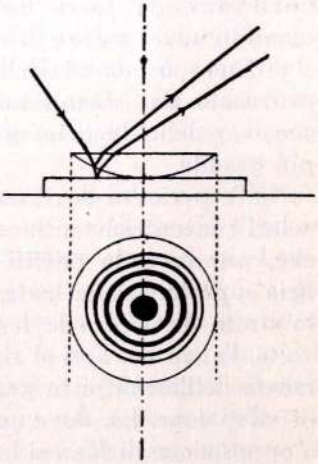


Fig. 10. — Schema della disposizione e del percorso dei raggi luminosi per ottenere gli anelli di NEWTON.

I due fenomeni hanno infatti una medesima origine: l'interferenza dei raggi luminosi. Quando due moti vibratori si sovrappongono in un punto, si ha un moto resultante in generale di ampiezza non nulla. In particolare però se i due

moti sono, come si usa dire, in opposizione di fase, cioè l'uno dà luogo a uno spostamento dell'ente vibrante in senso opposto a quello dell'altro, ma di uguale ampiezza, avviene che questo non si può muovere e cioè non vibra. In quel punto allora non si avrà piú suono, non si avrà piú luce. Se invece i due moti sono in concordanza di fase, e dànno luogo a spostamenti in ugual senso e di ampiezza eguale, allora si ottiene spostamento dell'ente, doppio di quello provocato dai singoli moti. L'intensità di un suono o della luce in quel punto sarà quindi piú grande.

Nell'esperienza degli anelli lungo le linee circolari concentriche si incontrano raggi luminosi che, pur essendo partiti insieme dalla superficie superiore della lente, hanno percorso l'uno lo strato d'aria fra la lente e il vetro per due volte, l'altro no. Essi si ritrovano quindi al momento dell'incontro in generale in diverso stato di vibrazione. Là, dove questo stato corrisponde a opposizione di fase, si ha un anello oscuro; invece là dove è capitata la concordanza, si ha un anello luminoso (Fig. 10).

Poiché a ogni colore corrisponde un diverso periodo di vibrazione le luci di diverso colore si separano all'uscita dalla lente e il fenomeno si ripete ogni volta che lo strato d'aria percorso da uno dei raggi richiede un tempo superiore al precedente di un intero periodo di vibrazione.

Pare tuttavia sia molto difficile alla mente umana non fingere ipotesi, buttar via le idee

preconcette, lasciarsi guidare ciecamente dai fatti, non fare della filosofia *a priori* davanti alla natura.

HOOKE ed HUYGHENS credevano che la luce fosse composta di due soli colori, nonostante la evidenza in contrario portata dalla prima esperienza del NEWTON. Due sole dovevano quindi esser le vibrazioni. Quando esse passano da un mezzo a un altro, alla superficie di separazione ha luogo una perturbazione che è causa della varietà di percezione dei colori. La visione colorata è dunque un fenomeno più soggettivo che obbiettivo.

Su queste basi HOOKE specialmente si è scagliato contro l'interpretazione data dal NEWTON dell'esperienza degli anelli e di quella del prisma. Nessuna meraviglia, quindi, che gli argomenti di HOOKE, che erano del resto gli stessi usati da HUYGHENS e da MARIOTTE, non potessero guadagnare la convinzione del NEWTON, il quale in certo senso si trovava già su una strada migliore dei suoi oppositori. Nessuna meraviglia se la polemica divenne tanto rovente che il NEWTON giurò di non pubblicare piú una riga finché vivesse HOOKE e, sotto pretesto che « la filosofia è una signora cosí esigente e litigiosa che affidarsi ad essa è gettarsi in dispute senza fine », tenne in seguito celate le sue opere. Il libro *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* gli fu quasi strappato di mano dallo HALLEY, lo scopritore della cometa (1667).

Ad ogni modo il seme lanciato dal GRIMALDI

doveva ormai svilupparsi nel fertile terreno coltivato dalle discussioni, cosicché in una conferenza, tenuta il 12 novembre 1801 da Thomas YOUNG, troviamo esposta, sulla base del cosí detto principio di HUYGHENS, la teoria dell'interferenza delle vibrazioni luminose, che giustifica gli anelli osservati dal NEWTON.

A quel tempo si è incerti tuttavia se le oscillazioni della luce siano trasversali o longitudinali, se avvengano cioè lungo la direzione di propagazione o perpendicolarmente ad essa. Già HOOKE, senza averne però le prove, considerò le vibrazioni della luce come trasversali.

Il fenomeno della polarizzazione della luce, studiato pienamente dal MALUS nel 1808, doveva portare le prove mancanti al tempo di HOOKE, che il processo vibratorio della luce consiste in oscillazioni ortogonali alla direzione di propagazione. Fino al 1821 tuttavia anche il grande FRESNEL persistette nel considerare le vibrazioni luminose come longitudinali. Ma da quella data non ci furono piú dubbi per nessuno.

La teoria dell'emissione non era tuttavia sbaragliata e stava dietro le quinte, perché l'*experimentum crucis* fra le due concezioni non era stato eseguito. La vecchia legge della rifrazione interpretata secondo i nuovi concetti dava per la velocità di propagazione delle onde luminose nell'acqua un valore inferiore di quello che esse hanno nell'aria. Se il fronte dell'onda incidente è infatti indicato, come nella figura 11,

da un piano normale al raggio incidente, esso nel primo mezzo sarà nella giacitura indicata da AB, nel secondo mezzo da $A'B'$. I segmenti AA' e BB' sono proporzionali alla velocità nei due mezzi. E si vede che AA', quindi la velocità nel mezzo piú rifrangente, è inferiore a BB', cioè alla velocità nel primo mezzo.

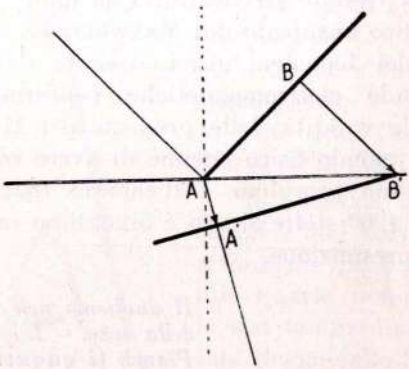


Fig. 11. — Schema della rifrazione secondo la teoria ondulatoria della luce.

Bastava dunque eseguire la misura della velocità della luce nell'acqua per sapere quale partito prendere in definitiva. Fu nel 1850 che FOUCAULT provò che la velocità della luce nell'acqua è inferiore a quella nell'aria, cosí come vuole la teoria ondulatoria e in contraddizione con quella dell'emissione.

Col 1850 il primo dualismo della concezione della luce ossia dell'energia radiante è eliminato e si può da quel momento parlare unica-

mente di vibrazioni di un vettore luminoso trasversali alla direzione di propagazione.

Il concetto meccanico, in conseguenza delle azioni che il campo magnetico e quello elettrico esercitano sulla direzione di vibrazione del vettore luminoso (effetti Faraday e Kerr), doveva presto esser sostituito da quello elettromagnetico auspicato dal MAXWELL. La riproduzione dei fenomeni ottici ottenuta dall'HERTZ con onde elettromagnetiche confermava in pieno la validità delle proposte del MAXWELL. Cosí il mondo fisico ritenne di avere raggiunto il dominio completo dell'energia raggiante e fino al 1900 stette sicuro e orgoglioso in questa felice presunzione.

Il dualismo nell'emissione della luce. – L'ipotesi del Planck (i quanti).

Le difficoltà uscite dalla porta dovevano però presto rientrare dalla finestra. Il dualismo, cacciato dalla "propagazione", doveva affacciarsi nuovamente quando si dovette risolvere il problema della "emissione" della luce.

Con lo spettroscopio e il fotometro negli ultimi anni dell'ottocento si erano accertati alcuni fatti notevoli relativamente allo spettro continuo emesso dai corpi incandescenti:

a) l'intensità localizzata nelle diverse frequenze dello spettro continuo non è costante, ma passando dalle frequenze piú basse (rosso)

alle piú elevate che siano registrabili (violetto) essa raggiunge un massimo (Fig. 12);

b) la frequenza in cui è concentrato il massimo dell'energia irraggiata dal corpo incandescente dipende dalla sua temperatura e non dalla sua natura. Col crescere della temperatura esso si sposta verso le frequenze piú alte (legge del WIEN) (Fig. 12);

c) l'energia totale irraggiata dal corpo è direttamente proporzionale alla quarta potenza della sua temperatura assoluta (legge dello STEFAN).

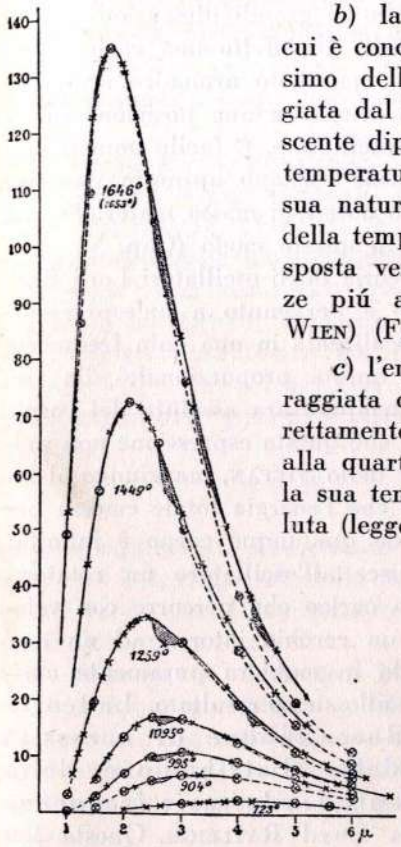


Fig. 12. — Distribuzione spettrale della energia radiante emessa da un corpo incandescente a diverse temperature. Sulle ascisse sono le lunghezze di onda (in *micron*), che procedono in senso inverso a quello delle frequenze.

Bisognava spiegare questi fatti.

Se la luce è una propagazione di onde elettromagnetiche simili a quelle che provengono

dall'oscillatore dell'HERTZ, nelle sorgenti luminose debbono esistere piccoli oscillatori che somigliano a quello di grandi dimensioni che si usa in laboratorio. In effetto una carica elettrica che vibra con moto armonico semplice, cioè pendolare, intorno a una posizione di riposo è un tale oscillatore. È facile immaginare che nelle molecole esistano appunto elementi elettrici, privi o dotati di massa materiale, che si comportano in questo modo (Cap. V).

Cosí con la teoria degli oscillatori Lord RAYLEIGH nel 1900 è pervenuto a un'espressione dell'intensità localizzata in una data frequenza che dice esser questa proporzionale alla frequenza e alla temperatura assoluta del corpo. È facile vedere che questa espressione non soddisfa alla legge dello STEFAN, ma giunge al resultato assurdo che l'energia totale emessa per irraggiamento da qualunque corpo è infinita!

Se si sostituisce all'oscillatore un rotatore, cioè un sistema carico che percorre con velocità uniforme un cerchio intorno ad un asse fisso, ragionando in maniera puramente classica si perviene allo stesso resultato. La teoria classica conduce dunque di necessità alla legge della distribuzione della energia radiante fra le varie frequenze formulata da Lord RAYLEIGH. Questa non corrisponde ai resultati sperimentali.

Ulteriori perfezionamenti introdotti nel ragionamento dal WIEN e da altri non migliorano

di molto la situazione. La fantasia del teorico è messa a dura prova.

In una memoria del 1902, giustamente famosa, Max PLANCK propone un'ipotesi che avrà grande successo per quanto debba prima incontrare molte opposizioni e sostenere molte battaglie.

La luce e in generale l'energia radiante non viene emessa dagli atomi o dalle molecole eccitate con continuità o, come direbbe un matematico, per infinitesimi, che sono arbitrarî. Essa viene espulsa soltanto quando nell'interno del centro emettente ha raggiunto un valore ben determinato, per quanto estremamente piccolo. Questo valore è eguale a:

$$\varepsilon = h\nu,$$

dove h rappresenta una costante di proporzionalità e ν è la frequenza della radiazione che si considera. La grandezza finita $h\nu$ è indicata alla latina colla parola *quantum*.

Il processo di emissione immaginato dal PLANCK è paragonabile a quello di caduta di una goccia d'acqua dalla bocca di un rubinetto. Finché la goccia non ha raggiunto un certo peso non può separarsi dal bordo della cannella.

Con questa ipotesi per fondamento e col sussidio di ragionamenti statistici, il PLANCK giunge a un'espressione dell'intensità d'energia

raggiante di una data frequenza a una certa temperatura, che si accorda in modo mirabile coi dati sperimentali, purché si ponga la costante h, fin qui indeterminata, eguale a

$$6{,}55 \times 10^{-27} \text{ erg per secondo.}$$

Questa costante, che assumerà una funzione importantissima nella meccanica del microcosmo, è detta costante universale del PLANCK.

Si dimostra che la legge di distribuzione dell'energia formulata dal PLANCK, non solo contiene in sé quella di Lord RAYLEIGH e le posteriori del WIEN, ma che essa giustifica la legge degli spostamenti e quella per l'energia totale irraggiata da un corpo alla temperatura assoluta T.

L'effetto fotoelettrico.

Il quanto del PLANCK viene tuttavia accolto con diffidenza, forse perché fin qui esso serba una figura un po' evanescente; esso sembra un artificio di calcolo, piú che un reale ente fisico. Affinché il quanto vinca le ostilità bisogna che acquisti un'individualità propria, indipendente. Occorre vederlo lavorare solo, non nella collettività dei suoi compagni, per sapere cosa vale e acquistare fiducia in lui.

L'occasione per ammirare le prodezze del quanto come individuo è pronta. I metalli colpiti dalla luce (Fig. 13) emettono cariche negative (elettroni) e si caricano quindi di elettri-

cità positiva. In questo consiste l'effetto fotoelettrico. Con opportune disposizioni si possono non solo mettere in evidenza, ma uti-

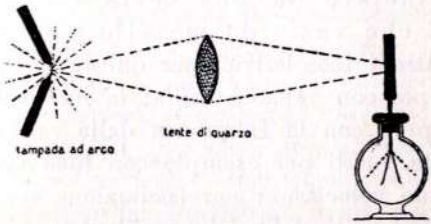


Fig. 13. — Effetto fotoelettrico. L'elettroscopio carico negativamente si scarica quando riceve sul disco metallico (zinco) i raggi ultravioletti emessi dalla lampada ad arco fra elettrodi di ferro.

lizzare anche a scopi pratici le correnti che si producono fra due elettrodi di cui uno è sensibile alla luce (cella fotoelettrica: Fig. 14).

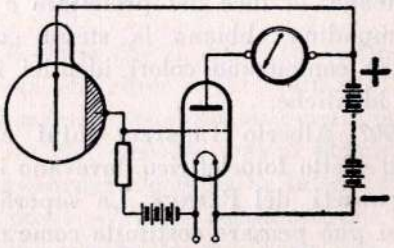


Fig. 14. — Schema di circuito pel funzionamento di una cella fotoelettrica.

In questo fenomeno noto fino dal 1880 ci sono due particolarità che però nessuno riusciva a spiegare. Ogni metallo per radiazioni

che hanno frequenza inferiore a una frequenza ben determinata non risponde al richiamo fotoelettrico, cioè esso emette elettroni solo a cominciare da una certa frequenza limite, che varia da metallo a metallo. Gli elettroni fotoelettrici per questa frequenza escono poi con velocità nulla; la loro velocità cresce però con la frequenza della radiazione incidente. Lenti per esempio con luce visibile, diventano velocissimi per eccitazione con raggi X. L'intensità della luce incidente non entra per nulla in tutto questo. L'energia degli elettroni emessi dal metallo è la stessa, sia che essi vengano espulsi per mezzo di un potente proiettore o mediante una piccola lampadina tascabile. Cambia nei due casi solo il numero degli elettroni fotoelettrici. Piccolo con la lampadina, esso è molto grande col proiettore, purché, s'intende, la luce del proiettore e quella della lampadina abbiano la stessa composizione, cioè contengano colori identici in proporzioni identiche.

Nel 1907 Alberto EINSTEIN intuí che nel gioco dell'effetto fotoelettrico dovevano intervenire i quanti del PLANCK. La superficie del metallo si può pensare costituita come di tanti minuti congegni, di minuscole macchinette da poter far lavorare: gli atomi. Questi congegni, queste macchinette non si mettono in moto, finché non hanno ricevuto dall'esterno una opportuna carica di energia.

Il fascio di luce che proviene dalla sorgente luminosa è la munizione a salve che esce dalla bocca di un cannone, è la rosa di pallini che viene lanciata dal fucile del cacciatore. Quando questi pallini colpiscono il metallo talvolta sí, talvolta no, un atomo riceve un pallino. Che ne riceva due o piú in una volta è assai poco probabile. Se l'atomo, il congegno infinitesimo, riceve un pallino, due cose possono succedere: o il pallino d'energia corrisponde all'energia occorrente per far funzionare il meccanismo e allora questo scatta; o il pallino ha energia inferiore alla minima necessaria per mettere in moto il congegno e questo rimane inerte.

Nel primo caso viene liberato un elettrone, nel secondo non avviene nulla. Se i pallini sono numerosi molti elettroni usciranno dal metallo, perché numerosi sono gli atomi messi a contributo. Se sono pochi la corrente elettrica sarà povera.

Ma può darsi che il quanto possegga piú dell'energia che serve a far scattare il meccanismo elementare, cioè piú di quanto occorre a liberare un elettrone dai legami atomici. E allora? L'eccedenza d'energia va in economia. Ma non del povero quanto eccitatore, che ormai è sparito, si è sacrificato, non esiste piú. Esso va in favore dell'elettrone che esce dall'atomo sempre piú ricco di energia e quindi sempre piú veloce quanto piú grosso è stato il quanto che lo ha liberato dalla prigionia.

Questo ameno discorso l'EINSTEIN ha formulato nella relazione severa.

$$h\nu = P + 1/2\, mv^2$$

energia del quanto incidente = energia di liberazione dell'elettrone + energia cinetica acquistata dall'elettrone

I due membri della relazione dell'EINSTEIN sono come i due piatti di una bilancia in equilibrio, per l'uguaglianza dei valori energetici che essi portano. Tale relazione rappresenta il principio della conservazione dell'energia applicato al meccanismo elementare dell'effetto fotoelettrico; essa infatti si riferisce all'effetto prodotto da un solo quanto. Essa quindi lo separa dagli altri emessi dalla sorgente. Per essa noi vediamo funzionare il quanto indipendente dai suoi compagni, come un individuo isolato.

È chiaro che un'ipotesi nella scienza ha valore generalmente anche se non elimina tutte le difficoltà di interpretazione dei fenomeni, purché le riunisca, le focheggi in una sola.

L'ipotesi del PLANCK, per se stessa un po' ostica, soddisfa pienamente a tutte le piú impellenti esigenze della fisica moderna; spiega la emissione dei corpi incandescenti ma anche lo spettro di righe emesso dai gas e dai vapori eccitati termicamente o per via elettrica, spiega la struttura dello spettro dei raggi X indipendenti e caratteristici della materia (Cap. V). In una parola i fenomeni di partenza delle radiazioni come quelli di arrivo sulla materia

sono giustificati dalla ipotesi della struttura granulare dell'energia radiante.

Meno bene il quanto si presta a interpretare la propagazione delle radiazioni, vista sotto la specie dei fenomeni di interferenza e diffrazione. Osserveremo in seguito come questa difficoltà venga concettualmente ridotta di importanza, se non eliminata del tutto (Capitolo IV). Per ora contentiamoci di pensare che esiste tuttavia la teoria classica della propagazione della luce, concepita come semplice meccanismo o come manifestazione elettromagnetica, la quale serve molto bene allo scopo.

L'effetto Compton.

Per tutto quello che abbiamo detto fin qui il quanto è un granello di energia, ma è sempre energia. Dal momento in cui Arturo COMPTON mise in evidenza un effetto, che gli ha guadagnato il premio Nobel e che porta il suo nome, il quanto è divenuto paragonabile proprio a un corpuscolo: il fotone. Questo significa che pensiamo il quanto abbia una certa massa, e che negli urti con altri corpi delle sue stesse dimensioni si comporti come si comporta una palla da bigliardo quando urta contro un'altra palla.

Era già stato notato da lungo tempo che quando un fascio di raggi X traversa uno strato materiale, la radiazione che emana dallo strato, lateralmente alla direzione di propagazione del

fascio primario, è meno dura di esso. In altri termini il fascio diffuso dal materiale traversato ha frequenza media piú bassa di quella del fascio incidente.

Il COMPTON volle avere la prova spettroscopica diretta di questo e analizzò la radiazione monocromatica del molibdeno diffusa da litio e alluminio, per esempio. L'esperienza non era facile e ha richiesto, le prime volte in ispecie, fatica non lieve. Il COMPTON ottenne, accanto alle righe della radiazione primaria, una riga spostata, di intensità talvolta inferiore ma talvolta anche superiore a quella della primaria (Figura 15). Lo spostamento dipendeva dall'angolo colla direzione dei raggi X incidenti sotto cui dallo spettroscopio era guardato il fascio diffuso.

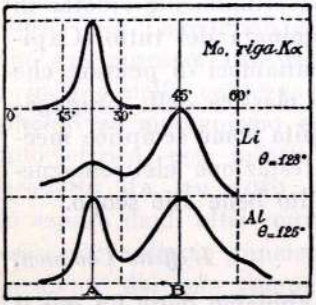


Fig. 15. — Effetto Compton. La curva *A* rappresenta la radiazione incidente; quella in *B* la radiazione spostata per effetto Compton prodotto in litio o alluminio.

Come spiegò il COMPTON la cosa non prevista da nessuna forma di teoria classica? In maniera molto semplice. Il quanto è come una pallina d'avorio. Esso se urta contro un'altra pallina, per esempio un elettrone, la mette in moto in una certa direzione. Perde cosí un poco

della sua energia e diventa cioè un quanto piú piccolo di quello che era prima. In queste condizioni si diffonde (Fig. 16). La sua direzione è legata a quella di movimento dell'elettrone dalla relazione del parallelogrammo delle quantità di moto. Su questo si può calcolare la variazione di frequenza del quanto che si è diffuso secondo un certo azimut e si trova che il valore della frequenza calcolato corrisponde a quello verificato dall'esperienza.

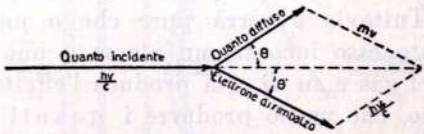


Fig. 16. — Schema di come si svolge l'effetto Compton, cioè relazione fra le quantità di moto del quanto incidente, dell'elettrone di rimbalzo e del quanto diffuso.

Il processo ideato dal COMPTON rende conto quindi in maniera perfetta dei fatti spettroscopici. Ma il COMPTON ha fatto di piú che ideare questo processo; egli lo ha voluto vedere. E per questo, insieme con SIMON, ha fatto avvenire la diffusione dei raggi X nel gas della camera di condensazione del WILSON.

Quando un quanto cammina attraverso a un gas esso non lascia traccia di sé se non al momento in cui tocca qualche molecola o parte di molecola del gas. Cosí è inutile sperare di trovare nella camera del WILSON le traccie dei quanti incidente e diffuso. Ma secondo la pre-

visione del COMPTON cosa deve fare il primo? Quando gli capita di incontrare un elettrone appartenente a un atomo o a una molecola del gas, e che a questi è legato molto debolmente, lo deve mettere in moto, come fa una palla da biliardo col suo pallino. Se non vedremo il fotone, vedremo invece la traiettoria dell'elettrone di rimbalzo, che lanciato attraverso al gas lo ionizza fino a perder tutta la sua energia.

Quello che resta del fotone naturalmente se ne va da un'altra parte e non si può vedere. Tuttavia avverrà pure che a un certo momento esso incontri un atomo o una molecola del gas e su di essa produca l'effetto fotoelettrico, che usano produrre i quanti se incontrano un atomo metallico o no. Il fotone allora cessa di esistere, perché cede la sua energia per intero all'elettrone fotoelettrico. Questo parte e genera ioni sui quali si condensa la nebbia al momento dell'espansione.

Tutto questo è lungo a raccontarsi, ma è rapido ad avvenire. Nel gas della camera del WILSON si dovrà quindi cogliere insieme: la traccia di un elettrone di rimbalzo prodotto dal quanto primario e quella di un elettrone fotoelettrico, indice della morte del fotone diffuso.

Le due traccie non sempre saranno colte insieme durante una espansione della camera; bisognerà quindi ripetere la prova molte volte affinché il fenomeno possa esser fotografato al completo. Cosí COMPTON e SIMON hanno ottenuto fotografie di nebbie, che molte volte, piú

di quelle che possano attribuirsi al semplice caso, si presentano come indica lo schema della figura 17. Se in esse si congiunge l'origine della traccia dell'elettrone fotoelettrico con quella dell'elettrone di rimbalzo si ha la direzione del quanto diffuso, la cui energia è deducibile dal percorso dell'elettrone fotoelettrico. La tan-

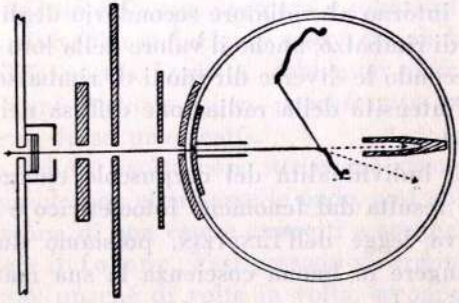


Fig. 17. — Schema delle fotografie ottenute alla camera del WILSON per l'effetto Compton. La traccia nera bassa è data dall'elettrone rimbalzante dopo che è stato colpito da un quanto X. Quella alta da un elettrone fotoelettrico liberato dal quanto diffuso dall'elettrone.

gente all'origine della traiettoria dell'elettrone di rimbalzo fornisce la sua direzione iniziale e la lunghezza del suo percorso nel gas la sua energia, quella che manca al fotone dopo l'urto con l'elettrone. La direzione e l'energia del quanto primario sono naturalmente note, perché in nostro arbitrio.

Ci sono quindi tutti gli elementi necessari per fare il calcolo e verificare se quanto dice la teo-

ria è confortato dal resultato della prova sperimentale. E la cosa impressionante è davvero verificata con una precisione quale sembra difficile attendere da un'esperienza così difficile a eseguire.

Il gioco del biliardo che il COMPTON ha giocato con fotoni ed elettroni è riuscito magnificamente. Tutto torna bene. Anche la distribuzione intorno al radiatore secondario degli elettroni di rimbalzo, anche il valore della loro energia secondo le diverse direzioni di rimbalzo, anche l'intensità della radiazione diffusa nei varî azimut.

Alla individualità del corpuscolo energetico, quale resulta dal fenomeno fotoelettrico e dalla relativa legge dell'EINSTEIN, possiamo dunque aggiungere in buona coscienza la sua materializzazione [1].

Relazione fra i dualismi della luce.

I tempi del NEWTON, il medio evo dell'ottica, sono ben lontani e noi siamo tornati a una concezione dualistica del fenomeno luminoso. Abbiamo in confronto di allora seguito un ordine inverso. Ai tempi del NEWTON dal concetto cor-

[1] *Per chi sia curioso di sapere come si calcoli la massa del fotone basti ricordare che dalla relatività ristretta resulta la relazione di equivalenza* $\Delta E/c^2 = \Delta m$*: un corpo che subisce una variazione di energia* ΔE *perde o guadagna una massa* Δm *e viceversa. Nel nostro caso* $\Delta E = h\nu$ *quindi* $\Delta m = h\nu/c^2$*. La quantità di moto del fotone che si propaga con la velocità della luce è* $\Delta m . c = h\nu/c$.

puscolare si è passati a quello ondulatorio. Oggi noi, oltre le ondulazioni, ammettiamo anche il corpuscolo.

Il nostro corpuscolo è però ben diverso da quello ipotetico dei Greci ed è meglio documentato del loro. Anche noi come i Greci e come NEWTON non l'abbiamo mai visto direttamente; noi però, a differenza dei Greci, l'abbiamo spiato al momento della sua partenza e soprattutto del suo arrivo sulla materia. Se esso fosse anche una semplice nostra finzione, dobbiamo ammettere che è una finzione felice, perché tutto avviene come se fosse una realtà.

Ma poiché molte cose succedono come se il corpuscolo non eliminasse le onde, cosí abbiamo la fortuna di non essere costretti a scegliere fra l'onda e il fotone. Essi possono vivere in buon accordo, purché di volta in volta, secondo i bisogni della ricerca, sappiamo esser discreti e non intrusivi, sappiano davanti alle porte cedere cortesemente il passo l'uno all'altro. Purché specialmente le onde vogliano esser modeste e tenersi assai di frequente in disparte. Se cosí si comporteranno, le onde saranno premiate. Cacciate dal loro campo naturale, verranno riabilitate là dove meno si poteva prevedere potessero trovare un impiego (Cap. III).

Il nostro dualismo è permanente perché è frutto di una perfezionata conoscenza dei fenomeni. Il dualismo dei tempi del NEWTON era transitorio, perché seguiva solo dalla necessità di spazzare dal campo della ricerca precon-

cetti senza fondamento sperimentale, residui di un aristotelismo non del tutto dominato dalla vittoria del metodo galileiano.

Il nostro dualismo nella concezione dell'energia radiante, che si generalizzerà in quello delle parti costituenti la materia, è forse da considerare un principio generale, inerente alla natura dei fenomeni naturali.

Per esso in ogni modo, mentre il profano vede in un fascio di luce una cosa forse bella, ma semplice e banale; mentre il poeta lirico in un raggio di sole sente la concitazione del proprio animo commosso dagli spettacoli naturali; il fisico, se dimentica che è talvolta piú riposante fare il profano o il poeta, guarda il raggio di sole e dubita ed esclama: « Quante cose saprei, se sapessi soltanto come è fatto un fascio luminoso! »

CAPITOLO III

ONDE E MATERIA

La diffrazione della luce. La diffrazione dei raggi X e degli elettroni. L'indice di rifrazione per gli elettroni. La struttura dell'elettrone come pacchetto di onde. Le relazioni fra la teoria ondulatoria e le sue basi sperimentali.

In un punto dei suoi manoscritti Leonardo da Vinci dice che se si guarda una sorgente di luce con gli occhi socchiusi si vede la sorgente colorata anziché bianca. La sorgente luminosa che guardava Leonardo era certo la fiamma di una lucerna ad olio, che ha forma allungata, e il fenomeno che egli ha osservato dipende dalle ciglia che si interpongono fra la sorgente e l'occhio. Esse sono infatti una serie di fili paralleli e costituiscono quello che noi chiamiamo un reticolo lineare.

Chiunque di noi può ripetere l'osservazione in condizioni migliori di quelle in cui si trovava Leonardo con la sua lucerna ad olio, se guarda una lampadina elettrica non smerigliata, di cui i filamenti siano visibili e stiano paralleli alle ciglia. Qualche cosa di piú complicato vedrà invece se ad occhio aperto guarderà un fanale della strada attraverso alla trama di seta del suo ombrello. Gli apparirà allora infatti una raggiera di punti iridescenti a partire da un unico centro bianco.

La diffrazione della luce.

Questi fenomeni prendono origine dalla diffrazione delle onde luminose che attraversano un reticolato lineare o a maglie poligonali.

La facile osservazione registrata da LEONARDO trova per la prima volta la sua riproduzione scientifica nella *Physico-Mathesis de Lumine* del GRIMALDI. Questo modesto fraticello secentesco ha inviato un fascio di luce bianca su una superficie piana rigata, o reticolo lineare, e ha visto che si ottengono intorno alla direzione del fascio riflesso molti spettri. Essi ripetono l'immagine della sorgente simmetricamente rispetto all'immagine centrale, che segue la legge normale della riflessione, e presentano dispersione dei colori contenuti nella luce della sorgente, cosí come fa il prisma. L'ordine in cui questi colori si succedono in ogni spettro è però inverso di quello cui dà luogo il prisma. Il raggio piú deviato da questo è il violetto, il quale col reticolo appare invece deviato meno di tutti gli altri.

L'effetto descritto si può ottenere anche per trasparenza attraverso a una lastra di vetro solcata con una punta di diamante da sottili righe parallele molto vicine l'una all'altra. Le rigature piú semplici adatte a dare qualche effetto sono di 10 tratti per millimetro; ma spesso si va fino a 600 tratti per millimetro e allora si hanno spettri molto dispersi e in cui sono rivelabili anche strutture molto minute delle radiazioni che compongono la luce.

In questi casi la sorgente è sempre una fenditura lineare illuminata e, se il reticolo è piano, occorrerà un conveniente sistema ottico per completare la disposizione e farla divenire quello

che prende il nome di spettroscopio a reticolo.

Quando la sorgente è puntiforme, cioè è un foro in una parete opaca illuminato da una parte, allora da un reticolato a maglie quadrate o a forma poligonale qualunque si ottengono fi-

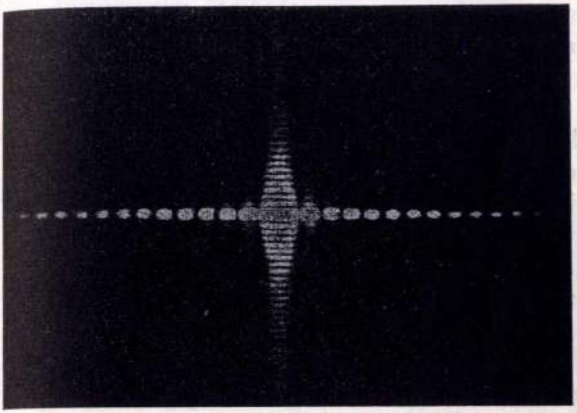


Fig. 18. — Figura di diffrazione ottenuta con reticolo a maglie rettangolari.

gure di diffrazione in tutte le direzioni ortogonali a uno dei fili della maglia (Fig. 18).

Facciamo l'esperienza con due reticoli lineari trasparenti disposti l'uno dopo l'altro a breve distanza. Teniamo fisso il primo reticolo e ruotiamo il secondo. Finché i tratti dei due reticoli sono paralleli si vede una sola successione di spettri che si sviluppa nella direzione perpendicolare a quella delle strie dei reticoli. Ma, ap-

pena noi giriamo il secondo rispetto al primo reticolo, dalla prima si separa una seconda serie di spettri che ruota intorno all'immagine centrale descrivendo coi suoi elementi cerchi concentrici. Se il reticolo di vetro che adoperiamo è poi solcato addirittura da strie circolari concentriche, distribuite uniformemente, un sottile pennello di luce a sezione circolare, che lo attraversa, dà luogo a una successione di spettri anulari.

La spiegazione dei fenomeni di diffrazione della luce sta nella sua natura ondulatoria. Si insegna ai fanciulli che la luce si propaga in linea retta; ma questo modo di presentare la propagazione della luce è fatto appunto pel caso in cui non si abbia voglia di entrare in particolari complicati. Se guardiamo bene al bordo di uno schermo opaco indefinito investito da un'onda piana (fascio di raggi paralleli), notiamo che dietro lo schermo penetra luce, la cui intensità si affievolisce rapidamente man mano che ci si allontana dal bordo (Fig. 19). Invece dalla parte dove, per la teoria delle ombre, dovrebbe trovarsi luce piena, si notano dei minimi di intensità luminosa sempre piú fitti e meno marcati man mano che cresce la distanza dal bordo (frange di diffrazione).

Se un fascio di luce parallelo traversa una fenditura molto stretta, a destra e a sinistra di essa si notano massimi e minimi di luce che si smorzano progressivamente e rapidamente (Fig. 20).

Se un fascio di luce parallelo traversa un

foro minutissimo, intorno all'immagine del foro si formano pure anelli iridescenti a raggio crescente e intensità decrescente.

C'è nei fenomeni descritti, detti di diffrazione, una evidente periodicità; essa è il riflesso della periodicità del processo luminoso, come

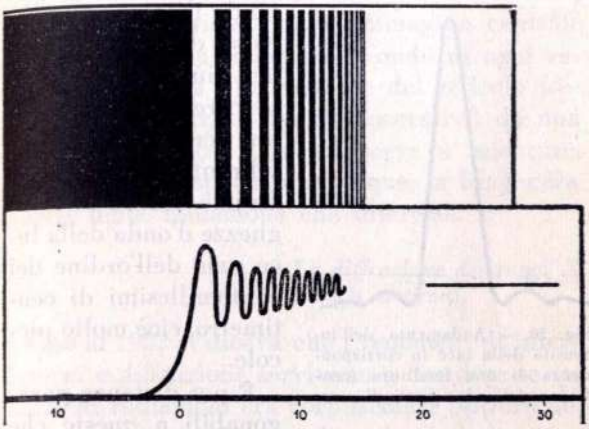


Fig. 19. — Schema di figura di diffrazione ottenuta al bordo di uno schermo opaco indefinito. Al di sotto l'andamento della intensità luminosa dietro il bordo e lungo le frangie di diffrazione.

lo erano gli anelli del NEWTON e i colori delle lamine sottili di cui abbiamo parlato nel capitolo precedente.

I fenomeni di diffrazione correggono la rigidezza della teoria geometrica delle ombre e mostrano che essa non è valida che a grandi distanze dai limiti delle superficie opache.

La periodicità del fenomeno luminoso è misu-

rata dalla frequenza della vibrazione luminosa (numero di oscillazioni per secondo), ma è misurata anche dalla lunghezza d'onda, cioè dalla distanza fra i due punti piú vicini del raggio di propagazione che si trovano in ugual stato di vibrazione. Questa è infatti legata alla frequenza da una relazione semplice, rappresentando il segmento percorso dalla vibrazione nel piú piccolo tempo occorrente perché da un certo stato l'ente vibrante torni nel medesimo stato[1]. Le lunghezze d'onda della luce sono dell'ordine dei centomillesimi di centimetro, cioè molto piccole.

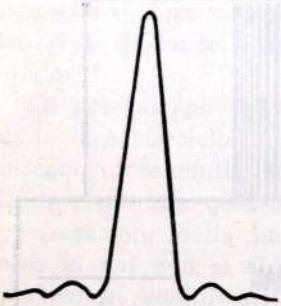


Fig. 20. — Andamento dell'intensità della luce in corrispondenza di una fenditura (centro) e dalle due parti di essa.

È per distanze paragonabili a queste che la teoria geometrica delle ombre cade in difetto, perché appunto non tiene conto del meccanismo con cui la luce si propaga; è per distanze molto piccole che si può veder la luce piegare dietro ai bordi opachi e produrre le frange dovute alla diffrazione.

I reticoli che abbiamo descritti non sono che

[1] *La relazione fra la lunghezza d'onda di una radiazione e la sua frequenza T di oscillazione è:*

$$\lambda = cT \text{ (c velocità della luce);}$$

quindi essendo $T = 1/\nu$, *ove con* ν *indichiamo la frequenza, si ha*

$$\nu = \frac{c}{\lambda}.$$

sistemi di fenditure, se lineari, o di fori, se di altra forma. Ogni fenditura, ogni foro del sistema dà luogo alle sue frange. La luce di queste quando si incontrano interferisce e cosí le loro intensità in certe direzioni si sommano, in altre si annullano.

Si hanno cosí spettri di 1°, 2°, 3° ordine ecc., a destra e sinistra della immagine centrale bianca; in essi la lunghezza d'onda di ogni radiazione è legata alla costante del reticolo (distanza fra due tratti opachi successivi) da una relazione semplice [1]. Questa serve a misurare, in un ordine di spettri qualunque, la lunghezza d'onda della radiazione che interessa.

La diffrazione dei raggi X e degli elettroni.

Fino al 1927 si diceva che i fenomeni di interferenza e diffrazione servivano a decidere se un fascio di radiazioni era corpuscolare oppure no. Solo nel caso si trattasse di onde elettromagnetiche si verificava infatti l'interferenza o la diffrazione.

Oggi possiamo ancora dire che interferenza e diffrazione sono la pietra di paragone del fenomeno vibratorio; ma se si ottiene interferenza o diffrazione non possiamo piú affermare, con

[1] *Fra la costante d del reticolo e la lunghezza d'onda* λ *di una radiazione osservata nello spettro di ordine n si ha, nel caso di onde piane incidenti su un reticolo piano:*

$$n\lambda = d. \text{ sen } \theta$$

se θ *è l'angolo che la direzione dello spettro fa colla normale al reticolo.*

la sicurezza di prima, che siamo di fronte a onde elettromagnetiche. Oggi infatti siamo riusciti a ottenere fenomeni di diffrazione anche con fasci che è bene accertato essere costituiti di corpuscoli veri e proprî, non di granelli energetici come i quanti di luce.

Possiamo tuttavia stare tranquilli: non faremo mai confusione fra onde e corpuscoli; non è infatti tanto facile realizzare esperienze come quelle dell'ottica, quando si vuol lavorare con corpuscoli, specialmente se questi hanno una massa dell'ordine di quella dell'idrogeno.

I resultati piú cospicui e netti si sono ottenuti con un particolare corpuscolo, l'elettrone. Esso si trova vagante nelle fiamme; esce dai fili incandescenti delle valvole termoioniche, la luce lo estrae dai metalli o dagli atomi gassosi che investe nell'effetto fotoelettrico, certe sostanze radioattive lo espellono spontaneamente dal loro nucleo (Cap. VI).

Di questo corpuscolo sappiamo, dalle misure classiche del MILLIKAN, che possiede una carica elettrica di 4,77 decimillesimi di milionesimo di unità elettrostatica, la piú piccola carica elettrica che si conosca; sappiamo che si comporta come se possedesse una massa 1845 volte piú piccola della massa di un atomo di idrogeno e come se non occupasse spazio superiore a quello di una sferetta del raggio di un decibilionesimo di cm circa.

Esso ultimamente ha rivelato un'ulteriore curiosa proprietà; esso gira nell'atomo intorno a

un proprio asse, cioè è paragonabile a una piú che microscopica trottola. Tutte le cariche elettriche che ruotano generano un campo magnetico; l'elettrone rotante è quindi anche una piccola calamita, forse la piú piccola che si conosca fin qui.

Questo elettrone, piú docile del fratello positivo, che ha dato tanto da fare per esser messo in evidenza (Cap.VIII), può nei nostri laboratorî non solo esser liberato facilmente dalla materia, ma essere dotato della velocità di traslazione che vogliamo noi in maniera molto semplice. Basta scaldare un filo conduttore con la corrente elettrica ed esso, se il filo sta nel vuoto, esce dal filo. Basta fornire al filo una conveniente carica negativa ed esso scappa piú o meno velocemente a seconda del valore delle forze repulsive in questo modo applicate al filo.

Esiste una relazione semplice fra la tensione applicata al filo e un elettrodo opposto ad esso, misurata ad esempio in volt, e l'energia cinetica che acquista in questo modo l'elettrone, quando ha raggiunto il secondo elettrodo [1]. Cosicché si usa indicare l'energia dell'elettrone col numero stesso dei volt che servono ad accelerarlo e si dice: usiamo elettroni di 10, 100, 1000, un milione di volt.

Orbene con fasci elettronici ottenuti cosí e cosí controllati C. J. Davisson e L. H. Germer,

[1] *La relazione a cui accenniamo è, se V rappresenta la tensione in volt, e la carica, m la massa e v la velocità dell'elettrone: $e V = 1/2\ m v^2 \cdot 300$.*

G. P. THOMSON ed altri hanno ottenuto figure di diffrazione. La prima esperienza è stata eseguita da DAVISSON e GERMER inviando gli elettroni su una delle superficie di un cristallo di nickel. La disposizione e il resultato che essi hanno ottenuto, sono rappresentati nelle figure 21 e 22.

Se gli elettroni che pervengono alla superficie del cristallo si comportassero come semplici corpuscoli materiali dovrebbero dirigersi dopo la collisione secondo una sola direzione,

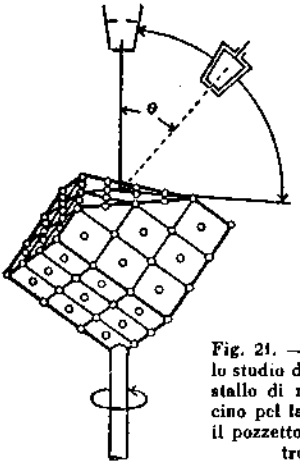


Fig. 21. — Schema della disposizione per lo studio della diffrazione elettronica. Il cristallo di nickel ha al di sopra il cannoncino pel lancio degli elettroni e da un lato il pozzetto di FARADAY che riceve gli elettroni diffratti dal cristallo.

quella di riflessione del fascio incidente rispetto alla superficie colpita. Invece DAVISSON e GERMER girando davanti al cristallo un cilindretto metallico (pozzo del FARADAY), con cui si raccolgono gli elettroni provenienti dal cristallo, trovano una successione di massimi e minimi di intensità di carica elettrica, in azimut diversi, come se si trattasse dell'intensità di un fascio di luce riflesso da un reticolo piano.

Digitized by Google

Piú semplicemente G. P. THOMSON, figlio di J. J. THOMSON, famoso per gli innumerevoli meriti acquistati verso la fisica dell'ottocento, ha fatto passare un pennello di elettroni attraverso a una lamina sottile di oro o di altro metallo. Su una lastra fotografica posta dopo la foglia

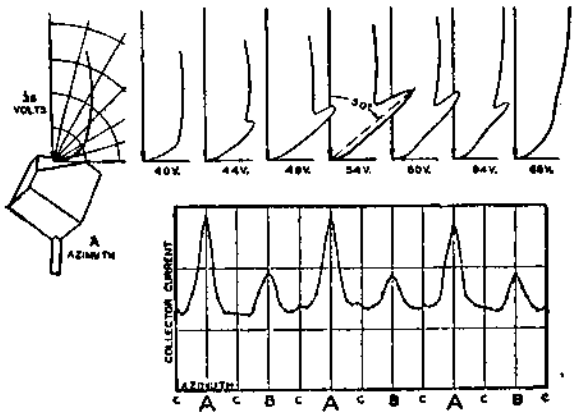


Fig. 22. — I resultati delle esperienze di diffrazione elettronica. La serie di schemi superiore dice quello che si ottiene nell'azimut di 50° con elettroni di diverse velocità. La figura inferiore dice quello che si ottiene in azimut diversi con elettroni di data velocità.

metallica egli ha registrato una successione di anelli a raggio crescente, col centro nel pennello elettronico (Tav. VII).

Salvo la continuità delle traccie, quello che ha ottenuto il THOMSON somiglia a quello che produce la luce quando ha attraversato un reticolo a maglie poligonali; tutto poi è analogo a quello che si realizza con un reticolo circolare.

Digitized by Google

E. RUPP del resto ha pure provato a inviare un fascio di elettroni lenti sopra un comune reticolo ottico con incidenza molto radente e per mezzo della lastra fotografica egli ha registrato uno spettro che ha proprio le apparenze dello spettro che si ottiene inviando sul reticolo stesso raggi luminosi.

Ma non bisogna lasciarci ingannare da analogie formali. La fisica ha il vantaggio sulle altre scienze naturalistiche del numero e finché i numeri non hanno parlato non si può esser sicuri delle conclusioni che si deducono dalle apparenze dei fenomeni.

Se quello che mettono in evidenza il pozzetto raccoglitore di DAVISSON e GERMER o la lastra fotografica degli altri sperimentatori è veramente una successione di spettri prodotti da onde elettroniche, le lunghezze di queste onde potranno esser misurate e dovranno ritrovarsi identiche nei diversi ordini.

Nelle prove eseguite dal RUPP col reticolo ottico per misurare le presunte lunghezze d'onda degli elettroni basterà usare la stessa relazione che lega la lunghezza delle onde incidenti all'angolo di diffrazione e alla costante del reticolo, di cui già abbiamo parlato. In questo caso tuttavia le immagini ottenute sono poco belle e la precisione delle misure che se ne deducono lascia un poco a desiderare. D'altra parte le esperienze del RUPP possono riuscire solo con elettroni molto lenti e quindi con esse

non si possono raccogliere tutte le notizie che ci interessano relativamente al comportamento di elettroni di diversa energia.

È preferibile quindi riferirci a quanto si ottiene con cristalli e con lamine metalliche e cercare quindi il modo con cui queste esperienze possono essere numericamente interpretate.

Tutto è cristallo salvo il vetro. Tutto cioè tende ad assumere disposizione interna tale che gli atomi siano distribuiti ai vertici di poliedri elementari, contigui l'uno all'altro. Anche il vetro man mano che invecchia cristallizza. Dunque anche una lamina metallica è cristallina. Ma ci sono monocristalli e policristalli. Ci sono cioè corpi in cui tutti gli elementi cristallini sono riuniti insieme in modo disordinato. In queste condizioni è spesso un pezzo di galena. In queste condizioni a maggior ragione è una qualunque lamina metallica in cui gli elementi isolati del cristallo non conservano fra loro rapporti d'ordine.

Ora un cristallo è un reticolo che si sviluppa secondo le tre direzioni dello spazio, invece che in un piano, come i reticoli ottici. Esso si comporta come i reticoli ottici in quanto colpito o traversato da determinate radiazioni dà luogo alla loro diffrazione.

Precisamente se col BRAGG si fa arrivare con incidenza conveniente sulla superficie di un cristallo unico, per esempio di calcite o di salgemma, un fascio di raggi X che proviene da

una fenditura sottile, su una lastra, opposta al fascio riflesso, si registra lo spettro di diffrazione del fascio incidente.

La differenza essenziale che si ha nel caso del reticolo cristallino rispetto a quello bidimensionale ottico è che con questo con una sola direzione del fascio incidente si ottengono tutti gli spettri di diffrazione desiderabili, mentre nell'altro per passare da un ordine di spettri al successivo bisogna cambiare l'incidenza del fascio primario. A ogni angolo di incidenza corrisponde qui infatti un solo ordine di spettri. Si ha tuttavia una relazione ben precisa che lega l'angolo di incidenza del fascio primario sulla faccia colpita del reticolo cristallino, la costante di questo, cioè la distanza fra due piani successivi del cristallo e la lunghezza d'onda dei raggi X usati nell'ordine di spettri in cui si fa la misura [1].

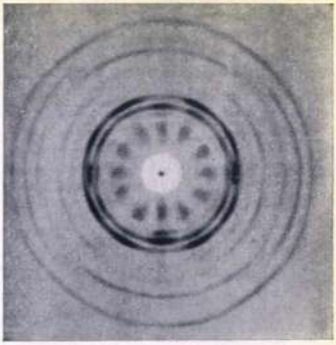
Se con DEBYE e SCHERRER si invia un fascio di raggi X su una polvere cristallina, si ottiene ancora una figura di diffrazione raccogliendo convenientemente i raggi che escono dalla polvere.

In questa esperienza la diffrazione ha ancora luogo su faccie di cristalli; ma queste in una polvere non hanno posizione fissa, esse assu-

[1] *Essa è:*

$$n\lambda = 2\,d\,\operatorname{sen}\theta$$

se d è la costante reticolare e θ l'angolo che forma con la normale al reticolo cristallino la radiazione di lunghezza d'onda λ vista nello spettro di ordine n.



a) Diagramma di Debye e Scherrer ottenuto con raggi X diffratti da magnesio (Schiebold e Siebel).

b) Anelli di Debye e Scherrer ottenuti per diffrazione di elettroni da un reticolo cubico semplice – NaF – (secondo Kirchner).

c) Anelli di Debye e Scherrer ottenuti per diffrazione di elettroni da cristalli di CdJ_2 (sec. Kirchner).

mono tutte le orientazioni possibili nello spazio. Per ogni faccia si hanno quindi coni di raggi X diffratti e i coni sono tanti quante sono le faccie che può presentare alla radiazione il monocristallo elementare. Sulla lastra si disegnano le sezioni di questi coni. Con una relazione fra la distanza della lastra dal punto della polvere colpito dal fascio primario, l'angolo d'apertura del cono registrato e le costanti del reticolo cristallino, si può una volta di piú risalire alla lunghezza d'onda della radiazione ad alta frequenza che è analizzata [1].

Ora l'esperienza di DAVISSON e GERMER è paragonabile a quella del BRAGG; mentre l'esperienza del THOMSON somiglia a quella di DEBYE e SCHERRER. In ambedue i casi usando le relazioni caratteristiche si è trovato che le lunghezze d'onda misurate sul primo spettro corrispondono a quelle che si ricavano dai successivi.

Il fenomeno è dunque veramente retto dalle relazioni proprie della diffrazione. Gli elettroni si comportano di fronte ai cristalli come se possedessero lunghezza d'onda dell'ordine di quella dei raggi X. Questa lunghezza d'onda varia tuttavia con la velocità con cui essi si spostano nello

[1] *Supposta la sezione della lastra col cono di radiazioni normale all'asse del cono stesso, se R è il raggio di questa sezione circolare, e D la distanza fra lastra e polvere cristallina:*

$$n\,\lambda = 2\,d\,\frac{R}{D}$$

ove n e d hanno il significato già loro attribuito prima.

spazio e cresce col diminuire della velocità, v, secondo la legge:

$$\lambda = \frac{h}{m\,v},$$

ove m è la massa dell'elettrone (9.10^{-28} grammi) e h è la costante del PLANCK, che compare una volta di piú in un fenomeno fisico. Mentre altra volta l'abbiamo vista definire un elemento di energia raggiante, ora essa connette fra loro grandezze proprie di un corpuscolo.

Dalla formula si calcola che elettroni di 10 volt hanno associata una lunghezza d'onda di $^1/_{100}$ di milionesimo di cm; quelli da 100 a 1000 volt di circa $^1/_{1000}$ di milionesimo di cm.

L'indice di rifrazione per gli elettroni.

Nel passare da un mezzo a un altro la luce cambia direzione di propagazione e tanto piú quanto piú corta è la sua lunghezza d'onda; esiste cioè un indice di rifrazione per ogni radiazione che la compone.

Hanno un indice di rifrazione anche i raggi X; esso però è troppo piccolo per esser rilevato in maniera semplice.

L'indice di rifrazione dei corpuscoli che traversano una superficie è invece abbastanza sensibile.

Sono le esperienze di DAVISSON e GERMER che lo hanno messo in evidenza. Gli spettri di diffrazione che si ottengono da un cristallo non stanno

proprio nelle posizioni definite dalla relazione che caratterizza la diffrazione dei raggi X, ma sono rispetto a queste posizioni lievemente spostati (Fig. 23).

Questo si spiega bene ammettendo che il percorso dei raggi elettronici nei primi strati del cristallo non sia come quello indicato pei raggi X dal BRAGG (Fig. 24), ma piuttosto cosí come in-

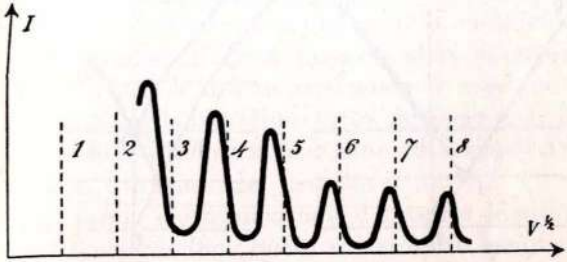


Fig. 23. — Le punteggiate di questa figura indicano le posizioni dei massimi di intensità di raggi X diffratti da un cristallo. La curva dà invece la posizione che assumono i massimi prodotti dagli elettroni di lunghezza d'onda (associata) corrispondente a quella dei raggi X.

dica lo schema della figura 25. L'andamento alla BRAGG si verifica solo dopo il primo strato atomico del cristallo; all'entrare nel primo strato invece si manifestano forze atte a deviare il cammino degli elettroni, e perciò a mutare la velocità di propagazione delle loro onde associate.

Si può intuitivamente giustificare l'esistenza di queste forze, quando si tratti di un cristallo conduttore. Questo ha nel suo interno un certo

numero di elettroni liberi, staccati cioè dai relativi atomi e vaganti fra le maglie reticolari. I centri del reticolo cristallino nelle immediate vicinanze della superficie esterna si possono considerare come carichi di elettricità positiva. Gli elettroni che si avvicinano al conduttore ven-

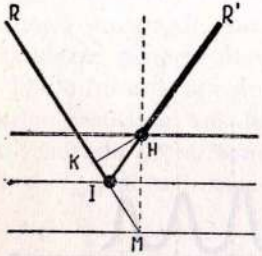


Fig. 24. — Percorso dei raggi X nell'interno degli strati cristallini di un cristallo. Nella direzione HR' interferiscono i raggi che provengono dal primo e dal secondo piano cristallino, purché sia soddisfatta la condizione $KI+IH=n\lambda$.

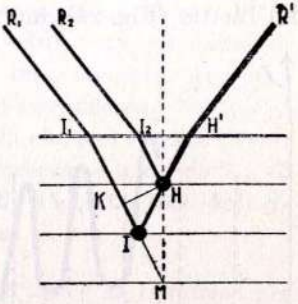


Fig. 25. — Percorso presunto degli elettroni nell'interno di un cristallo. Nell'attraversare la prima superficie il fascio elettronico si rifrange. Nell'interno le condizioni di interferenza si verificano come nel caso della figura 24.

gono perciò attratti e subiscono una accelerazione nella direzione della normale alla superficie del conduttore.

Questo modo di interpretare la rifrazione elettronica ricorda gli argomenti usati per spiegare la rifrazione della luce dai sostenitori della teoria corpuscolare. Vedremo nel capitolo successivo quale importanza ha il riconoscere che l'e-

sistenza di forze capaci di modificare la velocità degli elettroni equivale per essi all'esistenza di un indice di rifrazione nel campo in cui dominano queste forze.

La struttura dell'elettrone come pacchetto di onde.

La rifrazione delle onde elettroniche rafforza l'analogia stabilita dalla diffrazione fra la propagazione di elettroni e quella delle onde elettromagnetiche. È bene tuttavia stare in guardia e cercare se questa analogia può esser portata fino in fondo. Non tutto potremo vedere in questo capitolo, ma tentiamo tuttavia di avviare la soluzione del problema.

Un fascio elettronico non è proprio identico a un fascio di luce quale è concepito comunemente, non è cioè qualche cosa di continuo che lega in ogni istante la sorgente a un punto posto nello spazio antistante. Per ottenere da una sorgente luminosa un sistema di onde che si possa veramente paragonare a un fascio di elettroni bisogna ricorrere a un processo speciale di illuminazione dello spazio.

Accendiamo una lampada che emette luce di un sol colore. Dal suo filamento a ogni istante parte un impulso che si propaga con la nota velocità. Ogni impulso è seguito subito da un altro e perciò se isoliamo un raggio del fascio, possiamo su di esso immaginar di vedere quello che è disegnato nella figura 26, *a*: cioè un treno continuo di impulsi vibratorî partenti dalla

sorgente e limitati solo da un eventuale ostacolo posto sul cammino del fascio.

Ma noi possiamo anche spegnere e riaccendere la lampada; o meglio noi possiamo inserire davanti ad essa un disco girevole munito alla sua periferia di fori equidistanti fra loro. Fin-

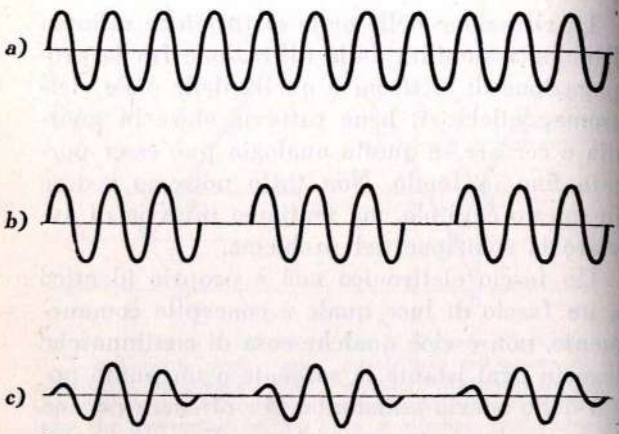


Fig. 26. — Diversi aspetti di treni d'onda.

ché il disco sta fermo e uno dei fori è nella direzione del fascio luminoso, lungo il raggio che cosí viene limitato, nulla è cambiato da prima. Ma mettiamo in moto il disco con un motorino. Allora la luce che emette la lampada è periodicamente intercettata. Gli impulsi che partono dalla sorgente sono di tanto in tanto interrotti. Ce ne accorgiamo quando davanti al fascio poniamo una cella fotoelettrica connessa per mezzo

di un circuito amplificatore a un altoparlante. Questo traduce la successione di impulsi luminosi che riceve la cella in impulsi sonori, che si fondono in una nota piú o meno alta a seconda della velocità di rotazione del disco.

Il disco girevole è dunque un coltello che taglia a pezzi il fascio luminoso. Quello che si vedrebbe, se si potesse, lungo il raggio che traversa uno dei fori del disco a un dato istante è rappresentato nello schema della figura 26, *b*. Lungo il raggio si avrebbero cioè tanti pezzetti di treno d'onda separati l'uno dall'altro da intervalli in cui non c'è piú vibrazione. Diciamo non c'è piú perché in effetto essa c'è stata qualche momento prima, quando uno dei pezzetti di treno d'onda si trovava in quella regione. Ci sarà di nuovo vibrazione quando il pezzetto di treno d'onda che precede sarà arrivato lí. Essi in ogni caso corrispondono al tempo in cui davanti alla sorgente è passato il settore opaco del disco.

In questo modo, in una prima approssimazione, è da pensare un fascio di corpuscoli. Ogni frammento del treno d'onda è un corpuscolo. La velocità con cui questo si sposta è la velocità con cui si sposta il frammento.

C'è però da considerare anche un'altra velocità: quella con cui dal principio alla fine del frammento si propaga l'impulso vibratorio. Essa è la velocità di propagazione dell'onda, detta velocità di fase. Essa può benissimo esser diversa da quella del corpuscolo, anche se nel

caso specifico che ci ha servito come esempio, non lo è.

Non è ancora infatti perfetta la nostra figurazione del corpuscolo come frammento di onde. Possiamo tuttavia completarla col considerare piú da vicino la velocità di fase delle onde di un frammento non assolutamente monocromatico.

Facciamo suonare insieme due canne d'organo che emettano la medesima nota. Si ha l'unisono. Ma se infiliamo un dito in una delle due canne, sentiamo che il suono subisce dei rinforzi periodici. Si hanno cioè dei battimenti. Essi sono originati dal fatto che una delle due canne, quella in cui abbiamo infilato la punta del dito, non emette piú una nota identica a quella dell'altra, ma una nota di frequenza alquanto superiore o inferiore. Allora, al momento in cui le due pulsazioni sono d'accordo, cioè hanno luogo nel medesimo senso, si ha rinforzo del suono. Ma in queste condizioni d'accordo, a causa della frequenza diversa, esse non si possono mantenere. La piú lenta perde rapidamente fase rispetto all'altra, finché avviene che le due vibrazioni si trovano in fase opposta e allora si ha un minimo di intensità sonora. Il fenomeno è ben noto agli accordatori di strumenti musicali; note corrispondenti di due strumenti non accordati danno luogo a battimenti.

Nel fenomeno dei battimenti sonori ci sono sempre due frequenze diverse: quella media

della vibrazione sonora e quella dei battimenti. La velocità di propagazione nello spazio dei due tipi di onde è in questo caso la stessa, perché la velocità di propagazione del suono nell'aria dipende poco dalla frequenza.

Ma potrebbe darsi che in un mezzo diverso dall'aria queste due vibrazioni che sono di altezza tanto diversa, si propagassero con diversa velocità. Si avrebbero allora la velocità della vibrazione e quella dei battimenti nettamente distinte.

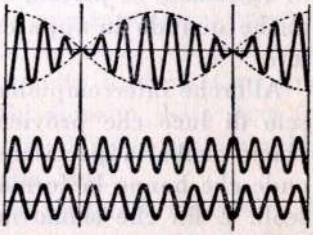


Fig. 27. — La formazione dei battimenti.

Orbene un corpuscolo non si può mai considerare come un frammento di onde perfettamente monocromatico, esso è piuttosto un pacchetto di onde a piccola differenza di frequenza, e perciò si può paragonare, in una rappresentazione un po' piú accurata della precedente, al tratto di onde che sta fra due minimi nella figurazione dei battimenti (Fig. 27). La regione in cui questo tratto si estende in pratica non è piú grande del diametro della particella stessa, pur avendo i suoi limiti teorici all'infinito.

Cosí l'immagine di un fascio di corpuscoli è data dalla figura 26, *c*. La velocità dei pacchetti è quella dei corpuscoli, quella delle vibrazioni

del pacchetto è la velocità propria dell'onda associata.

Questa conformazione non è caratteristica del corpuscolo in quanto tale. Essa non è stata inventata apposta per lui. Essa era stata messa in evidenza da Lord RAYLEIGH per i frammenti di luce, che non sono mai monocromatici in modo perfetto, ma che resultano da un insieme di vibrazioni di piccola differenza di frequenza, anche quando in apparenza sono di un sol colore.

Allorché interrompiamo periodicamente il fascio di luce che proviene dalla lampada lanciamo nell'aria precisamente dei pacchetti di onde che hanno la forma indicata per i corpuscoli. E fin che siamo nell'aria o nel vuoto la velocità di propagazione del pacchetto non si differenzia in modo sensibile da quella delle onde che compongono il pacchetto. Ma appena si arriva per esempio nell'acqua la velocità di propagazione delle singole onde che compongono il pacchetto non rimane la stessa di prima, perché l'indice di rifrazione cambia con la lunghezza d'onda. Allora nel traversare la superficie di separazione fra aria e acqua il massimo dei battimenti, a cui corrisponde il massimo di intensità del pacchetto, cambia posizione rispetto a un punto fisso. La velocità del pacchetto è cioè modificata. In generale la velocità del pacchetto in un mezzo, in cui le onde che lo compongono hanno velocità diversa fra loro, e che per questa ragione si dice dispersivo,

non è piú quella delle onde che compongono il pacchetto [1].

Dalla distinzione fra la velocità del pacchetto (velocità di gruppo) e quella delle sue onde (velocità di fase) deriva una conseguenza per lo meno curiosa. Generalmente la velocità di fase descresce col crescere della lunghezza d'onda e allora la velocità del gruppo è inferiore alla velocità di fase. Ma quando si verificasse il caso che la velocità di fase aumentasse col crescere della lunghezza d'onda, la velocità del pacchetto sarebbe superiore a quella di fase. Ora quest'ultima è eguale alla velocità della luce nel vuoto, quindi la velocità del pacchetto sarebbe superiore a quella della luce.

In contraddizione col postulato fondamentale della relatività, può dunque esistere una velocità superiore a quella della luce!

Ma esiste essa davvero? Esiste ed è la velocità delle onde associate al corpuscolo. Per essa si trova [2]:

$$u = \frac{c^2}{v}$$

[1] *Se v è la velocità del pacchetto e c quella della luce nel vuoto si ha:*

$$v = c - \lambda \frac{dc}{d\lambda}$$

Quindi $v \lesseqgtr c$, secondo che $\frac{dc}{d\lambda} \gtreqless 0$.

[2] *$\lambda = uT$, se T è il periodo della vibrazione, ossia $u = \lambda\nu$, se ν è la sua frequenza; ma per un corpuscolo è $\lambda = h/mv$, quindi ricordando che in prima approssimazione è $h\nu = mc^2$:*

$$u = \frac{h\nu}{mv} = \frac{mc^2}{mv} = \frac{c^2}{v}$$

v, velocità della particella, è sempre inferiore a c velocità della luce, quindi u, velocità del gruppo, è sempre largamente superiore a c.

Cosí, se esistessero onde associate all'idrovolante che Francesco AGELLO il 10 aprile 1933 ha guidato sul lago di Garda alla velocità di circa 700 km all'ora, esse avrebbero la velocità di propagazione di ben 460 mila milioni di km all'ora.

La luce ne fa solo 10 mila milioni circa. Si ha dunque ragione di considerare AGELLO l'uomo piú veloce del mondo!

Ma non è serio giocare troppo sugli equivoci. La relatività afferma che non si possono lanciare segnali che abbiano velocità superiore a quelli luminosi. Ora nessuno ha mai visto e vedrà mai gli elettroni comunicare fra loro mediante le loro onde associate. Se nessuno lo ha mai visto e non lo vedrà mai c'è la sua buona ragione. La relatività parla di sistemi reali ben definiti che si muovono nello spazio. Le onde associate agli elettroni sono ben lontane dall'essere identificabili con quelle di un vettore elettromagnetico propagantesi nello spazio (Cap. IV).

Le relazioni fra la teoria ondulatoria e le sue basi sperimentali.

In questa esposizione non abbiamo rispettato la storia. Abbiamo piuttosto data la precedenza ai resultati sperimentali sebbene questi nel pre-

sente caso abbiano seguito le considerazioni teoriche, e da esse siano stati provocati.

C'è una logica nella storia. Ma c'è una logica anche in questo modo di presentare le cose. Le due logiche non coincidono, ma possono coesistere.

Quando Luigi DE BROGLIE, il fratello minore del duca Maurizio, noto per le sue ricerche sui raggi X, nel 1925 proponeva una nuova meccanica nella quale alle particelle materiali in moto doveva esser associata un'onda di lunghezza $\lambda = h/mv$, quando SCHRÖDINGER sviluppava quest'idea e scriveva la sua famosa equazione (Cap. IV), essi non si proponevano altro scopo che quello di introdurre un algoritmo nella meccanica atomica, atto a eliminare le difficoltà di calcolo, che si erano presentate nella trattazione di problemi complicati, con la meccanica di tipo astronomico usata fino allora.

Essi non pensavano forse affatto alla realizzazione con corpuscoli di processi fisici paragonabili a quelli che si ottengono con onde propagantesi nello spazio. Tanto è vero che la prima esperienza fatta in proposito non è stata eseguita in Francia o in Germania, ma in America. Eppure né in Francia né in Germania mancavano gli uomini capaci di fare quello che hanno fatto DAVISSON e GERMER. Non parlo dei mezzi sperimentali, perché se essi sono delicati, non sono però né acrobatici, né dispendiosi.

Alla meccanica dell'infinitamente grande DE BROGLIE e SCHRÖDINGER vogliono sostituire la

meccanica dell'infinitamente piccolo e si fanno guidare nel crearla da una semplice analogia.

Noi usiamo dividere l'ottica in due parti: ottica geometrica e ottica fisica. La prima dice che la luce si propaga in linea retta in un mezzo omogeneo e isotropo e vale finché la luce non rasenta bordi opachi, non attraversa fenditure o fori. Essa non si preoccupa che la luce sia un fenomeno vibratorio. L'altra è l'ottica della luce considerata come fenomeno vibratorio. La meccanica ordinaria newtoniana si può paragonare all'ottica geometrica. Facciamo allora una meccanica che stia alla meccanica newtoniana come l'ottica fisica sta alla geometrica. Essa sarà appunto la meccanica valida pel microcosmo, come l'ottica fisica vale tutte le volte che si considerano fenomeni che hanno luogo a piccola distanza dai corpi che la luce sfiora, a distanza precisamente non troppo grande rispetto alla lunghezza d'onda delle radiazioni luminose.

Con l'associare un'onda alle particelle in movimento L. DE BROGLIE ha appunto ottenuto questo resultato; e dal punto di vista suo tutto sarebbe andato bene lo stesso, anche se fossero mancate le conferme sperimentali. Anche cioè se l'esperienza non avesse accertato che tutto avviene appunto come se le particelle in moto fossero dei gruppetti di onde che si spostano con la velocità della particella.

Sono venute le conferme sperimentali e Luigi DE BROGLIE è stato laureato col premio Nobel. La cosa è molto significativa.

Prima del DE BROGLIE un'altra volta nella fisica si è presentato il problema di correggere la meccanica di GALILEO e NEWTON. Quando cioè è apparsa la necessità di considerare moti di corpi che posseggono velocità prossima a quella della luce. A risolvere il problema ha pensato EINSTEIN con quella teoria che ha preso il nome di relatività.

Questa teoria ha avuto per opera dello stesso EINSTEIN molte successive incarnazioni. L'ultima porta, forse, il numero tre. Ma di tutte le relatività che EINSTEIN ha inventato ce n'è una sola che vive realmente una vita utile non solo alle soddisfazioni della logica matematica, o alle elucubrazioni cosmiche. Essa è la prima, quella che chiamiamo relatività ristretta. Essa interviene nella fisica quotidiana del novecento, perché dice due cose che l'esperienza ha verificato e di cui la fisica dei corpi veloci, come gli elettroni proiettati in un tubo ad alto potenziale o i raggi α e β delle sostanze radioattive, non può fare a meno.

Primo dice: la massa di un corpo varia con la sua velocità. E si è visto con molta accuratezza entro limiti di velocità molto ampi che in effetto la massa dell'elettrone in riposo, cioè lento, è piú piccola della massa di quello che si sposta a gran velocità.

Secondo dice: una variazione di massa equivale a una variazione di energia e viceversa. Nei processi radioattivi, in cui si hanno variazioni di energia notevoli a ogni espulsione di masse

dal nucleo atomico, si è potuto fare un confronto fra l'espressione teorica e i dati numerici.

Tutto il resto della relatività, per quanto filosoficamente importante, per la fisica d'azione ha valore limitato.

Solo quando la teoria è confortata dalle prove dell'esperienza diretta acquista una efficacia, una potenza di convinzione tali da dissipare qualunque dubbio e riuscir fonte di nuovi progressi e fertile di frutti impensati.

Anche quando la teoria precede l'esperienza, come avviene in qualche caso di fortunata ispirazione, essa acquista vita vera e diviene sicuro strumento di indagine solo appena trova la corrispondenza in fenomeni ben accertati.

È la metodologia stessa delle scienze naturalistiche che vuole cosí. E la logica di certe esposizioni, infedeli alla storia, può essere giustificata dallo spirito del metodo insegnato con l'esempio da GALILEO GALILEI.

CAPITOLO IV

INDETERMINAZIONE E PROBABILITÀ NELLA FISICA ATOMICA

La rappresentazione e la trajettoria delle onde. L'equazione di SCHRÖDINGER. *Il significato di* Ψ. *Il principio di indeterminazione. Come la meccanica ondulatoria risolve i problemi fisici. Conclusione.*

L'ENERGIA radiante si è triturata nelle nostre mani in granelli energetici, i quanti, che si comportano talvolta come corpuscoli dotati di massa.

Gli elettroni si sono trasformati in gruppetti di onde simili a quelli che passano attraverso ai denti della ruota di FIZEAU, che ha servito a misure della velocità della luce.

Forse solo perché non si deve occupare che di materia ed energia, la fisica moderna non ha che una coppia di dualismi.

Piú fortunati di NEWTON e di HUYGHENS noi non dobbiamo però sostenere una battaglia perché si dia la preferenza all'una o all'altra delle due concezioni dell'energia e della materia. Noi siamo molto tolleranti e accogliamo ospitalmente sia l'onda che accompagna il corpuscolo, sia il corpuscolo che deriva da un'onda. E questo non per scetticismo o difetto di combattività, ma per una ragione piú specifica.

Sul dualismo di concezione dell'energia radiante e dei corpuscoli sono fondate le nuove regole del gioco. Esso modella ormai la forma

di ragionamento con cui vengono impostati e risolti i problemi della meccanica del microcosmo.

Il dualismo della materia permette di sostituire alle equazioni della dinamica classica del NEWTON, quelle che D. BERNOULLI aveva scritto nel 1753 per una propagazione di onde nello spazio. Ma il significato della grandezza tipica che compare in tale equazione è suggerito dal dualismo dell'energia radiante e conduce di nuovo al corpuscolo.

Il corpuscolo non sarà però guardato piú come un individuo isolato. Esso farà parte di una comunità assai numerosa. Esso varrà per noi come vale pel legislatore il cittadino di uno stato governato scientificamente sui dati che fornisce l'Istituto Centrale di Statistica. Le sue azioni e le sue fortune saranno misurate colle percentuali ricavate dalle azioni e dalle fortune di una folla di individui. Folla composta di milioni per lo statista, di bilioni e trilioni e numeri anche piú elevati di componenti per noi. Ma non facciamo troppe anticipazioni che a questo punto possono apparire alquanto oscure e procediamo invece per ordine. Promettiamo anche di rispettare questa volta l'ordine della storia.

La rappresentazione e la traiettoria delle onde.

Dal punto O di un raggio venga lanciato su di esso un impulso vibratorio. Per fissar le idee il raggio sia una corda tesa, di cui un estremo è nella mano e l'altro è fissato a un sostegno,

in S (Fig. 28). Diamo un brusco spostamento laterale al pezzetto di corda che è in mano. Pel collegamento che le particelle di questo pezzetto hanno con quelle del resto della corda,

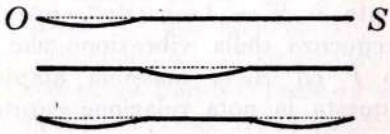


Fig. 28.

l'impulso impresso si trasmette di strato in istrato e arriva dopo un certo tempo all'altro estremo della corda. Se abbiamo intanto tenuta ferma la mano che regge la corda, e altri impulsi non sono partiti da O, i punti fra i due

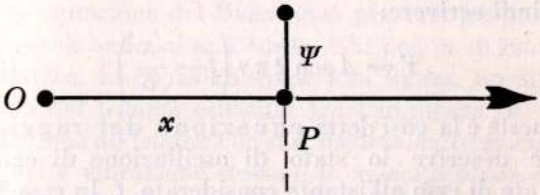


Fig. 29.

estremi, dopo aver piú o meno sensibilmente oscillato, si sono fermati.

Ci proponiamo questo problema. Sia P un punto intermedio della corda posto a distanza x da O. Dopo un tempo t, inferiore a quello che occorre perché l'impulso elastico da O arrivi

a S, quale è lo spostamento di P dalla sua posizione di riposo?

Se P fosse all'origine, cioè il tempo venisse contato dal momento in cui P comincia a spostarsi, potremmo scrivere senz'altro che il suo spostamento è $\Psi = A \operatorname{sen} 2\pi\nu t$, ove ν indica la frequenza della vibrazione che compie il punto P ed A la massima ampiezza di essa. È questa la nota relazione caratteristica del moto oscillatorio armonico semplice, o pendolare.

Nel nostro problema la vibrazione di P comincia dopo che l'impulso ha percorso il segmento x alla velocità v, cioè dopo il tempo $\frac{x}{v}$; per introdurre nella relazione superiore il tempo da cui si inizia la vibrazione in P dovremo quindi scrivere:

$$\Psi = A \operatorname{sen} 2\pi\nu \left(t - \frac{x}{v}\right) \qquad (1)$$

Questa è la cosí detta equazione del raggio, che descrive lo stato di oscillazione di ogni punto di esso all'istante considerato, t. In essa Ψ rappresenta in generale un vettore, cioè un segmento orientato nello spazio secondo la direzione in cui ha luogo lo spostamento.

Nel caso delle onde elettromagnetiche piane si scriveranno due relazioni analoghe alla (1) [una col seno e l'altra col coseno dell'argomento $2\pi\nu\left(t - \frac{x}{v}\right)$] in cui Ψ significa una volta una

forza elettrica e l'altra una forza magnetica. L'onda elettromagnetica è infatti la propagazione di vibrazioni ortogonali al raggio di due forze di tale natura. Esse sono perpendicolari fra loro, se l'onda è piana.

Invece della (1) possiamo scrivere un'altra relazione piú generale per descrivere lo stato di vibrazione di un punto P posto su un raggio lungo il quale si propaga un sistema di onde. I matematici vedono subito che per doppia derivazione dalla (1) si ricava:

$$\frac{d^2 \Psi}{dx^2} + \frac{4 \pi^2 \nu^2}{v^2} \Psi = 0 . \qquad (2)$$

Questa relazione ha validità piú estesa della (1), che è solo una sua soluzione particolare. Per quanto non sia proprio identica, essa equivale alla equazione del BERNOULLI per una propagazione di onde su una corda. Chi non sa di matematiche, la consideri come una figura, un simbolo del legame esistente fra l'ampiezza di vibrazione all'istante che si considera, la frequenza ν della vibrazione stessa e la velocità v con cui essa si sposta nella direzione di propagazione.

Potremmo tradurla in parole, ma la cosa, per la comprensione di quanto vogliamo dire, ha poca importanza. Basti osservare che, se da essa si ricava il valore di Ψ in funzione della variabile di spazio, x, in sostanza si dà lo stato di vibrazione dei punti dello spazio e si descrive la traiettoria che segue la vibrazione.

Ora, finché la velocità di propagazione v è

costante, la soluzione della (2) rappresenta una propagazione rettilinea di onde di frequenza ν. Quando nel mezzo esistono condizioni per le quali la velocità di propagazione viene modificata da punto a punto, la traiettoria dell'onda è curvilinea.

La cosa è intuitiva. Il cammino di un fascio luminoso infatti si spezza e devia quando il fascio passa da un mezzo di un certo indice di rifrazione a un mezzo di indice diverso. Ora l'indice di rifrazione non è che il rapporto fra la velocità di propagazione dell'onda nel primo mezzo e quella nel secondo. La grandezza $1/v$, che compare nel coefficiente di Ψ presso la (2), è dunque proporzionale all'indice di rifrazione del mezzo che si considera rispetto al vuoto, e il fattore di proporzionalità è l'inverso della velocità della luce nel vuoto [l'indice di rifrazione è c/v].

Il cammino di un raggio di luce in un microscopio per esempio non è già piú rettilineo, ma può esser rappresentato da una spezzata. Il raggio luminoso deve infatti passare dall'aria al vetro, attraversare di nuovo aria e poi altri gruppi di lenti e tornare nell'aria.

Ma esistono molti fenomeni naturali nei quali si trovano traiettorie senz'altro curvilinee dei raggi luminosi dovuti a variazioni di indice di rifrazione che avvengono non bruscamente, come in un sistema ottico, sibbene con continuità.

Tale è il miraggio, caratteristico del deserto, noto agli arabi e spiegato dal MONGE, il

fisico che Napoleone condusse con sé nella spedizione in Egitto. Gli strati d'aria che sovrastano la sabbia hanno densità decrescente verso l'alto e in conseguenza a un osservatore possono produrre le note illusioni (Fig. 30).

Tale è la fata morgana, che invece si pre-

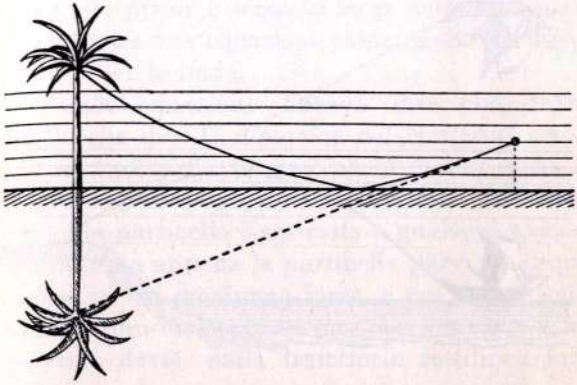


Fig. 30. — La traiettoria dei raggi luminosi nel miraggio (linea continua). La punteggiata è la direzione in cui l'osservatore vede l'oggetto.

senta su superficie acquose e piú fredde dell'aria sovrastante. La curvatura della traiettoria luminosa è qui inversa a quella che presenta il miraggio (Fig. 31).

La parallasse stellare nota agli astronomi, il raggio verde, ispiratore di romanzi di avventure e che a Cagliari, nelle giornate limpide, si può osservare dall'Università quando il sole tramonta dietro i monti del Sulcis, sono

tutti fenomeni prodotti dall'incurvarsi dei raggi luminosi negli alti o bassi strati atmosferici che non hanno densità eguale a diverse altezze.

Anche le onde elettromagnetiche propriamente dette possono presentare traiettorie curvilinee. Per esse però non bastano variazioni

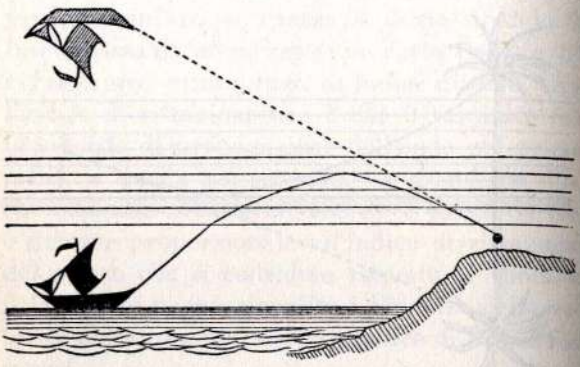


Fig. 31. — La traiettoria dei raggi luminosi nella fata morgana.

di densità a determinare variazioni nella velocità di propagazione. Per esse occorrono variazioni dello stato di ionizzazione dell'aria. Da queste deriva l'incurvamento dei fasci di onde corte; e talvolta avviene la loro perdita perché i fasci sono avviati per successive rifrazioni al di là della stratosfera: tal altra invece i fasci sono guidati agli antipodi, se si producono riflessioni totali su quello strato ionizzato, che prende il nome da HEAVISIDE.

L'equazione di Schrödinger.

Abbiamo detto che DE BROGLIE e SCHRÖDINGER si erano proposti di correggere la meccanica newtoniana alla maniera con cui l'ottica ondulatoria completa e corregge l'ottica geometrica (Cap. III). Per questo essi dovevano sostituire alla prima e seconda legge della dinamica newtoniana una equazione come quella del BERNOULLI per le onde.

Questa equazione doveva dire però tutto quello che dice la dinamica del NEWTON e cioè che la traiettoria di una particella in moto è rettilinea e viene percorsa con velocità uniforme finché la particella è sottratta a qualsiasi azione esterna; ma appena la particella perviene in un campo in cui dominano forze, a cui essa è sensibile, allora essa subisce una accelerazione e in generale devia dalla traiettoria rettilinea iniziale.

Quello che per le onde è determinato dall'indice di rifrazione, per le particelle è una conseguenza dell'esistenza o no di forze nello spazio da esse attraversato.

L'equivalente delle forze presso le particelle è l'indice di rifrazione presso le onde. Bisognerà dunque trovare un'espressione dell'indice di rifrazione delle particelle considerate come onde in funzione delle forze che dominano nello spazio in cui si muovono e l'indice dovrà esser tale nei varî punti che la traiettoria delle nuove onde sia identica a quella delle particelle.

L'elegante problema cosí impostato ha avuto la sua soluzione nell'identità che traduce il coefficiente di BERNOULLI in quello di SCHRÖDINGER:

$$\frac{4\pi^2\nu^2}{v^2} = \frac{8\pi^2 m}{h^2}(E-U) \qquad (3)$$

ove E rappresenta l'energia totale della particella nel campo, U quella potenziale, m la sua massa e h è l'inevitabile costante del PLANCK.

Se si tien conto che $(E-U)$ è l'energia cinetica della particella, $m\,v^2/2$, si ricava facilmente dalla (3) la relazione $\lambda = h/mv$, che rappresenta la lunghezza d'onda associata alla particella dal DE BROGLIE e che è stata verificata dall'esperienza (Cap. III). L'espressione dell'onda associata e il coefficiente di SCHRÖDINGER, proporzionale al quadrato dell'indice di rifrazione della particella, sono dunque equivalenti.

Il significato di Ψ.

Il problema del moto di un corpuscolo in un dato campo di forze è riportato cosí alla soluzione dell'equazione del BERNOULLI col coefficiente di SCHRÖDINGER:

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} + \frac{8\pi^2 m}{h^2}(E-U)\Psi = 0 \qquad (4)$$

Vediamo però bene da vicino cosa significa risolvere questa equazione. Significa procurarsi il valore della grandezza Ψ in un determinato punto dello spazio e a un determinato istante.

Ma cosa è Ψ nella equazione di SCHRÖDINGER? In quella del BERNOULLI Ψ è l'ampiezza dell'ente vibrante: lo spostamento delle molecole del corpo nel suono; il vettore elettrico o magnetico presso la luce.

Nel tentare di definire il significato dello Ψ di SCHRÖDINGER non perdiamo di vista che siamo di fronte a un problema di meccanica e che Ψ ci deve dire in quale punto dello spazio si trova la particella a un dato istante.

Dall'imbarazzo che ci siamo procurati con l'introdurre un dualismo della concezione della materia ci libererà il dualismo della concezione delle radiazioni.

L'intensità della luce inviata da una sorgente su uno schermo posto alla distanza r è:

$$J = k \frac{A^2}{r^2}, \qquad (5)$$

cioè, oltre che inversamente proporzionale al quadrato della distanza fra la sorgente e lo schermo, l'intensità è direttamente proporzionale al quadrato dell'ampiezza massima delle vibrazioni luminose nella sorgente.

Supponiamo che lo schermo sia una superficie di metallo. Noi possiamo misurare l'intensità della luce che lo colpisce contando il numero totale degli elettroni che esso emette per effetto fotoelettrico in un secondo. Questo numero moltiplicato pel valore del quanto che emette la sorgente darà l'intensità in unità energetiche.

Sempre seguendo il metodo fotoelettrico, possiamo, invece di lavorare con tutta la superficie dello schermo metallico, dividere questa superficie in tanti piccoli pezzi e contare il numero di quanti che essa riceve su ogni pezzetto. E allora abbiamo una sorpresa. Ogni centimetro quadrato del metallo non riceve un ugual numero di quanti in un secondo, né lo stesso centimetro quadrato riceve ugual numero di quanti in secondi successivi.

Se però facciamo la somma dei quanti ricevuti da ogni centimetro quadrato in un certo tempo e poi dividiamo per il tempo, ritroviamo il valore dei quanti determinato prima, riferendoci a tutta la superficie.

Il fatto è che sotto il bombardamento dei quanti emessi dalla sorgente la superficie metallica è come un disco da tiro a segno sotto la rosa di pallini partenti da un fucile a ripetizione armato di munizione da cacciatore di uccelli. A ogni sparo i pallini si distribuiscono nello spazio in maniera diversa e quindi diverso è il numero di essi che pervengono in spari successivi alla stessa porzione del disco; come, non essendo la distribuzione dei pallini uniforme nella rosa, superficie diverse allo stesso istante non ricevono ugual numero di pallini (Fig. 32).

Solo se facciamo piú volte la media su un gran numero di spari e su una estensione non piccola della superficie, ritroviamo ogni volta il medesimo numero di pallini per secondo e per centimetro quadro.

L'intensità della luce che investe lo schermo è dunque un dato statistico che resulta dalla media del numero di quanti che arriva in un secondo su ogni centimetro quadro dello schermo; per la (5) anche A^2 è quindi proporzionale a tale numero e lo rappresenta.

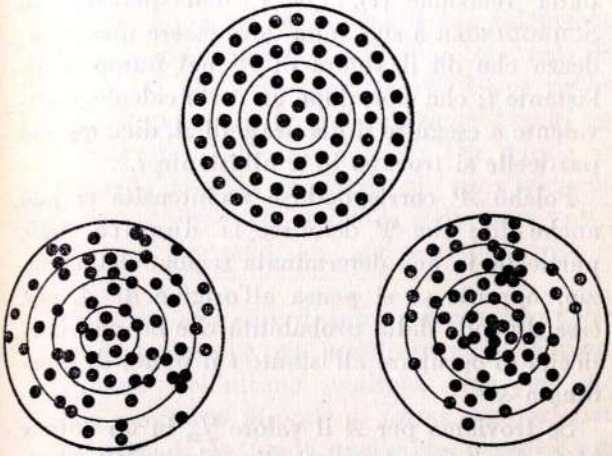


Fig. 32. — Distribuzione regolare e due distribuzioni casuali di pallini su uno schermo.

E quando non si fa la media, A^2, proporzionale all'intensità istantanea nel punto considerato, è la frazione di particelle luminose che arrivano in quel punto e in un secondo, è la probabilità di arrivo delle particelle in quel punto e in quel secondo.

Infatti con probabilità di un determinato evento intendiamo il rapporto fra il numero

dei casi favorevoli e quello dei casi possibili per quell'evento.

A parità dell'ultimo, il numero degli eventi favorevoli vale come misura della probabilità.

Ora lo Ψ dell'equazione di BERNOULLI è legato all'ampiezza massima della vibrazione, A, dalla relazione (1). Lo Ψ dell'equazione di SCHRÖDINGER a sua volta deve essere una grandezza che dà il valore di A^2 nel punto x all'istante t; che cioè, dopo un certo calcolo, equivalente a eseguire il quadrato di A, dice quante particelle si trovano in x all'istante t.

Poiché A^2 corrisponde a un'intensità si può anche dire che Ψ definisce la densità delle particelle in una determinata regione dello spazio; oppure, se si pensa all'origine di A, che essa dipende dalla probabilità che ha una particella di occupare all'istante t il punto di coordinata x.

Se troviamo per A il valore $^1/_{10}$ in un dato x al tempo t, questo vorrà dire che su 10 particelle presenti una sola potrà andare in x, su 100 dieci e cosí via. Se è presente una sola particella capiterà una volta su 10 che essa vada in x.

Lo Ψ di SCHRÖDINGER è dunque una grandezza che definisce una probabilità; essa è un numero, uno scalare, non un vettore orientato come la Ψ della equazione di BERNOULLI. Si chiama scalare di campo.

A suo tempo abbiamo parlato di velocità

di fase e velocità di gruppo e abbiamo detto che la velocità della particella è quella di gruppo; mentre la velocità di fase rappresenta la velocità con cui si propaga l'onda media associata alla particella. Essa è cioè la velocità con cui si propaga la perturbazione rappresentata dallo scalare Ψ.

Ma Ψ è una perturbazione di cui fisicamente non conosciamo altro che il valore che esso definisce, A^2, che è una densità, che è una probabilità. In sostanza come figurazione d'onda esso non ha un significato specifico. Per questo anche se la velocità apparente di quest'onda misteriosa è superiore a quella della luce non si crea una contraddizione coi postulati della relatività.

Ma possiamo dire di piú: in fondo non è vero che la particella sia costituita come abbiamo descritto nell'ultimo capitolo, cioè che essa è un pacchetto di onde di forma e caratteristiche speciali. In fondo quello che è vero è questo: le leggi della probabilità vogliono che essa si comporti come se fosse fatta cosí. Ed essa dà luogo a fenomeni di interferenza e diffrazione come quelli dell'ottica, perché questi fenomeni corrispondono alla probabilità che corpuscoli i quali colpiscono ostacoli fatti in un certo modo si diffondano e distribuiscano nello spazio con certe leggi.

Tale è l'interpretazione quantistica dei fenomeni di interferenza e diffrazione.

E ne segue che in sostanza, con un elegante gioco di bussolotti, noi abbiamo fatto comparire e poi scomparire il dualismo della materia.

Il principio di indeterminazione.

Quando io sono davanti a un'urna che contiene 50 palle bianche e 50 nere e mi preparo a estrarre una palla, ho la probabilità $^1/_2$ che esca una palla bianca. Di fronte all'avvenimento dell'estrazione di una palla bianca, che mi interessa, io sto dunque con una notevole esitazione, perché esso può aver luogo oppure no.

L'impostazione probabilistica della meccanica ondulatoria introduce una incertezza nella soluzione dei problemi, che certo non esisteva nelle soluzioni individualistiche della meccanica newtoniana. Con la meccanica di SCHRÖDINGER abbiamo dunque perduto qualche cosa: la sicurezza degli avvenimenti.

Cosí può parere: ma Werner HEISENBERG ci consola affermando che noi eravamo gli illusi, noi credevamo di veder nettamente in un mondo che di necessità è invece indeterminato. Quello che abbiamo perduto non lo possedevamo, perché non esisteva. Cosa fa la meccanica newtoniana quando studia il moto di un corpo? Scrive la relazione fra l'accelerazione e le forze che agiscono sul corpo nel tempo in cui il moto è considerato. Con operazioni convenienti (integrazioni) deduce poi le relazioni fra velocità e tempo e fra spostamento e tempo. Perché que-

ste relazioni siano complete bisogna però introdurre in esse due dati fisici da supporre noti o da misurare: la posizione e la velocità del corpo a un determinato istante, l'attuale p. es. (costanti di integrazione). Senza questi dati le relazioni ottenute sono inutilizzabili nella pratica. Con essi le relazioni stesse rappresentano la storia del corpo e contengono la profezia del suo avvenire.

Il passato e il futuro sono cioè conoscibili attraverso il presente. Cosí con un'equazione e poche osservazioni l'astronomo può predire il momento di un'ecclisse lunare. E l'errore che commetterà sarà una questione di pochi secondi, riducibile con dati sperimentali sempre piú precisi.

Ma possiamo noi conoscere il presente di una particella in moto, di un elettrone, di un fotone? Qui sta il punto.

Werner HEISENBERG nega che si possa conoscere il presente di una particella appartenente al microcosmo atomico; che si possa cioè determinare insieme la sua posizione nello spazio e la sua velocità all'istante attuale. Se riusciamo a procurarci con precisione la prima, ci farà difetto la seconda e viceversa. La cosa è troppo importante perché non cerchiamo di capirla meglio.

Ci sono le esperienze che si fanno; quelle che non si fanno per pigrizia o perché costano troppo e quelle che non si fanno perché non si

possono fare. A quest'ultimo tipo appartengono le esperienze ideali.

Esse sono esperienze troppo belle per esser realizzate; in esse mancano attriti, isteresi, perdite di calore; in esse per esempio ci si move rimanendo fermi, ovvero ci si sposta con velocità superiore a quella della luce; infine si

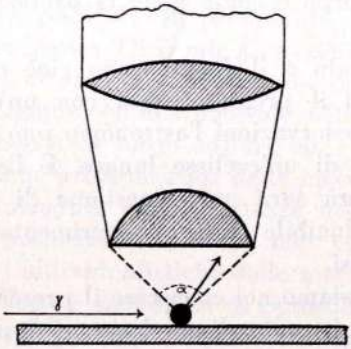


Fig. 33. — Microscopio dell'HEISENBERG.

guarda quello che è invisibile. La fisica teorica è ricca di esperienze ideali.

Werner HEISENBERG per giustificare il suo punto di vista propone appunto la seguente esperienza ideale.

Noi vogliamo studiare un elettrone; per studiarlo dobbiamo guardarlo. Poiché è piccolo fingiamo di portarlo sotto l'obbiettivo di un microscopio potentissimo e quando è lí illuminiamolo (Fig. 33).

Come tutti gli oggetti illuminati esso diffonde

intorno a sé la luce e una parte di essa entrerà nell'obbiettivo del microscopio rivelando cosí al nostro occhio non solo che l'elettrone esiste, ma anche dove si trova e come si move al momento dell'esame.

Cosí raggiungeremo il nostro scopo? No, qualche considerazione basta a toglierci questa speranza.

Un microscopio di un punto luminoso non dà un'immagine puntiforme. Esso dà una figura di diffrazione formata da un dischetto luminoso, circondato da un certo numero di anelli concentrici alternamente oscuri e luminosi. Per conseguenza due punti non si vedono separati, se la distanza fra le loro immagini è troppo piccola rispetto al diametro del disco centrale della figura di diffrazione. In queste condizioni due punti appaiono come un punto solo (Figura 34, *a*, *b*). Se l'elettrone fosse fermo, noi potremmo fotografare la figura di diffrazione e dire che l'elettrone stava nel suo centro. Ma esso si move, cioè in tempi successivi occupa posizioni successive infinitamente vicine e indistinguibili l'una dall'altra. Dopo aver eseguita un'istantanea dell'elettrone e aver ottenuta la sua immagine sulla lastra, potremo solo dire che l'elettrone si trovava là dove sono i punti del campo dell'obbiettivo, che hanno dato luogo al dischetto centrale della figura di diffrazione. La posizione dell'elettrone ci è nota quindi solo a meno del raggio del cerchio del primo anello oscuro.

Questo raggio però è tanto piú piccolo quanto piú piccola è la lunghezza d'onda della radiazione illuminante. L'incertezza nella determina-

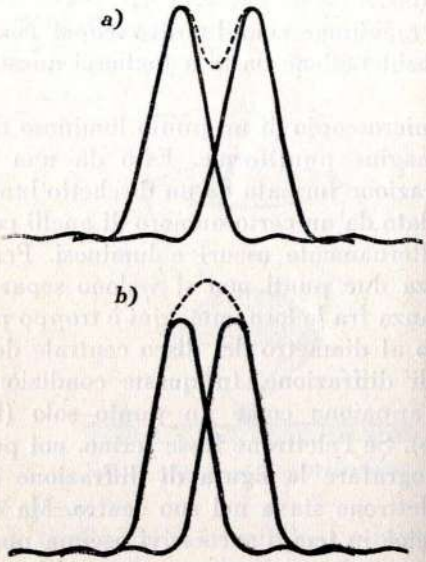


Fig. 34. — Distribuzione dell'intensità intorno a due punti luminosi vicini. Nel caso *a*) i due punti appaiono separati, nel caso *b*) essi si presentano indistinguibili. La curva dell'intensità luminosa infatti in *a*) presenta un minimo centrale che non c'è piú nel caso *b*).

zione delle coordinate dell'elettrone diminuisce quindi col diminuire della lunghezza d'onda della luce inviata sull'elettrone.

Riduciamo allora questa: invece di adoperare

luce verde o violetta o ultravioletta adoperiamo raggi X o meglio raggi γ emessi da sostanze radioattive, la cui lunghezza d'onda è centomila volte piú breve di quella dei raggi ultravioletti. L'indeterminazione sarà quindi centomila volte ridotta; la precisione della misura delle coordinate dell'elettrone, centomila volte piú grande di prima.

Voi osserverete che non ci sono nei laboratori di fisica meglio attrezzati microscopi che possano utilizzare raggi X o γ, che non sono refrangibili. Ma nel laboratorio ideale, dove si fanno le esperienze ideali, non manca nulla. C'è anche quello che la tecnica non può costruire.

Quando l'elettrone passa nel campo del microscopio lanciamo su di esso un fascio di raggi γ. Questo fascio è composto di quanti. L'elettrone è piccino e, anche se i quanti del fascio sono numerosi, può avvenire che esso non venga colpito da un quanto. L'elettrone rimane incolume, ma noi non vediamo nulla. Continuiamo il bombardamento: capiterà pure una volta di colpire l'elettrone! Infatti a un certo momento riceviamo un quanto nell'occhio. In compenso.... l'elettrone non c'è piú sotto il microscopio! Cosa è avvenuto?

Non avevamo pensato che esiste l'effetto Compton e che questo rovina ogni cosa. L'elettrone si è preso un poco dell'energia del quanto incidente e ne ha profittato per scappare dal suo posto.

Mentre cercavamo di guardarlo e perché lo

abbiamo guardato, lo stato cinematico dell'elettrone si è modificato.

Pazienza, ma almeno il quanto diffuso dall'elettrone stesso penetrando nell'obbiettivo e raggiungendo l'occhio ci insegna come si trovava l'elettrone all'istante dell'urto?

Nemmeno questo ci è dato sapere; perché la provenienza del quanto diffuso ci è nota con molta incertezza. Tutto quello che è nel campo angolare dell'obbiettivo arriva all'occhio e se l'obbiettivo è corretto, come deve, non si può dire di un raggio che strada ha percorso. Se è stato percepito esso stava certo entro l'angolo di apertura dell'obbiettivo.

Piú approssimati di cosí non si può essere e allora la quantità di moto e in conseguenza la velocità acquistata dall'elettrone sfuggito si può calcolare a meno di questa incertezza angolare.

Se indichiamo con Δx l'indeterminazione delle coordinate e Δp quella della quantità di movimento si ottiene [1]:

$$\Delta x \,.\, \Delta p = h \qquad (6)$$

[1] *Il calcolo si può fare cosí. La distanza piú piccola fra due punti che si vedono separati è:*

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2 \operatorname{sen} \alpha}$$

D'altra parte la relazione dell'effetto Compton, che dà l'aumento della quantità di moto dell'elettrone, si può scrivere:

$$\Delta p = 2 \frac{h}{\lambda} \operatorname{sen} \alpha$$

Per moltiplicazione delle due si ha la relazione del testo.

Una volta di piú appare h, la costante del PLANCK, in una relazione riguardante grandezze atomiche.

Non è questa l'unica esperienza ideale che conduce a questo resultato. Esperienze analoghe si possono ideare per fotoni e corpuscoli materiali piú grossi dell'elettrone. Esse possono eseguirsi rimanendo nei concetti ordinari oppure mettendosi dal punto di vista della meccanica ondulatoria. E tutte conducono ad affermare: Se diminuiamo l'errore nella misura delle coordinate aumentiamo quello nella determinazione delle velocità e viceversa. Questa fatale indeterminazione è uguale a 6.55 10^{-27} erg/sec.

Gli errori che si commettono sperimentando superano naturalmente tale valore. Ma non sono gli errori sperimentali che limitano la portata concettuale delle esperienze. Qui siamo di fronte proprio a un'incertezza di principio, che ci deve indurre a modificare il nostro modo di pensare e di parlare.

Non potremo piú dire: un elettrone ha la tale velocità nel tal punto dello spazio. Ma dovremo piuttosto esprimerci cosí: l'elettrone che sta nel tal punto dello spazio possiede una velocità compresa fra il valore v e il valore $v + \Delta v$; oppure l'elettrone che ha la velocità di tanti cm al sec si trova fra il punto di coordinata x e quello di coordinata $x + \Delta x$.

Le indeterminazioni Δv e Δx a cui ci rife-

riamo si ricavano naturalmente dalla (6). Gli eventi atomici ci sono noti solo a meno di una certa approssimazione, e ci pongono di fronte a un'incertezza che giustifica l'impostazione probabilistica della meccanica ondulatoria.

Come la meccanica ondulatoria risolve i problemi fisici.

I metodi del calcolo delle probabilità di cui fa uso la meccanica ondulatoria sono le leggi di quello che noi chiamiamo caso: le leggi dei fenomeni che al momento in cui si manifestano sono sottoposti a condizioni che sfuggono al nostro controllo diretto o per la complessità o per la loro variabilità da istante a istante o infine, come vuole HEISENBERG per gli elementi del microcosmo atomico, a causa della nostra specifica incapacità di determinarle.

Ma le leggi delle probabilità sono utilizzate in molti campi della fisica meno nuovi della meccanica atomica. La teoria cinetica dei gas per esempio ha per fondamento il calcolo delle probabilità. Ebbene la teoria cinetica dei gas conduce a esprimere la relazione fra pressione volume e temperatura del gas, che è una legge ben definita e precisa.

Anche la meccanica ondulatoria quindi perverrà nella risoluzione dei suoi problemi a espressioni in cui l'incertezza dogmatica dei principî non si fa piú sentire.

È interessante dare un esempio del modo

come la meccanica ondulatoria giunge a questo. Trattiamo quindi un problema tipico.

Sia una lamiera incurvata come indica la figura 35. Alla sua base A poniamo una palla di avorio. Usiamo un martello di peso eguale a quello della palla o di poco superiore, sospeso come un pendolo, e che si può quindi sollevare

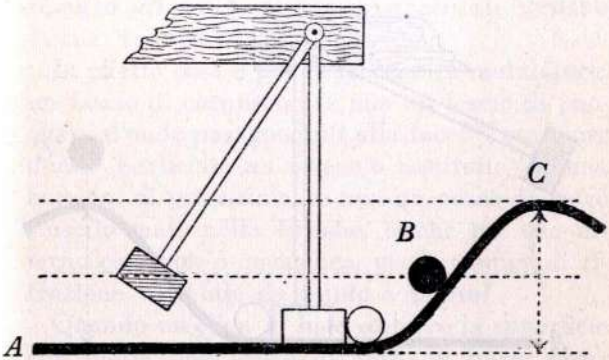


Fig. 35.

fino a una certa altezza e poi lasciar ricadere. Con questo martello diamo un colpo alla palla. Essa risale la curva AC per un certo tratto, ad esempio fino in B, ma poi ricade e torna al punto di prima. Solleviamo un po' piú in alto il martello e lasciamolo di nuovo cadere sulla palla. Essa questa volta sale poniamo fino in C e qui può scivolare lungo la curva dalla parte esterna. Se però il martello è caduto da un'altezza supe-

riore ancora, la palla è proiettata con violenza al di là della barriera (Fig. 36).

Sollevare il martello a diverse altezze è dargli un'energia potenziale tanto piú grande quanto piú elevato è il livello a cui è portato al di sopra di *A*. Lasciar ricadere il martello sulla palla è trasformare l'energia potenziale del martello in cinetica e far sí che esso la ceda poi alla palla.

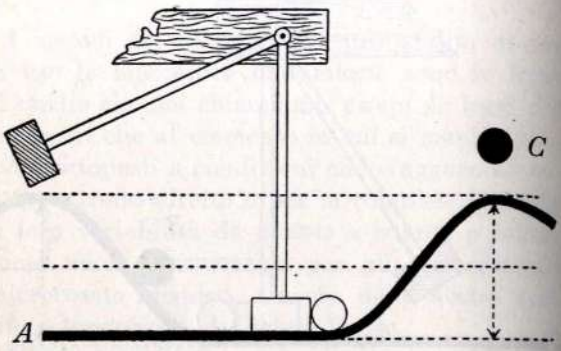


Fig. 36.

In conclusione possiamo dire che la palla non supera il dislivello *AC* che se possiede un'energia cinetica eguale o superiore all'energia potenziale corrispondente al dislivello *AC*.

Secondo la meccanica classica perché la palla salti un ostacolo che le si para davanti bisogna che essa possegga energia cinetica eguale o superiore alla potenziale piú elevata presentata dall'ostacolo. E la condizione è rigorosa, inevitabile, senza alternative.

La meccanica ondulatoria è invece piú ottimista; essa prevede che palle fornite di energia cinetica inferiore a quella necessaria secondo la meccanica classica vadano al di là della barriera. Ma non perché la saltino come un cavallo in corsa salta una siepe, ma perché la forano come un bambino che si introduce di sotterfugio nell'orto del vicino a rubar frutta, o come un raggio di sole che traversa un grosso vetro trasparente.

In effetto cosa è per la meccanica ondulatoria un fascio di corpuscoli se non un fascio di pacchetti d'onde paragonabili alla luce? Cosa è per queste particelle un ostacolo costituito da una barriera di potenziale, se non un pezzo di vetro riuscito male nella fusione, sicché nel suo interno esso non è omogeneo, ma ha indice di rifrazione variabile da punto a punto?

Quando un'onda di luce colpisce la superficie che limita una lastra di vetro in parte torna indietro riflettendosi nel primo mezzo, in parte traversa il vetro ed esce invece, rifrangendosi, dall'altra banda della lastra. Cosí è per un fascio di particelle che colpiscono una barriera di potenziale. L'intensità del raggio riflesso corrisponde al numero delle particelle che non superano l'ostacolo; l'intensità del raggio rifratto rappresenta il numero delle particelle che raggiungono il mezzo posto al di là della barriera.

Quando la meccanica classica dice in modo perentorio alle particelle: di qui non si passa! la meccanica ondulatoria piú mite le avverte: ba-

date che la superficie è speculare e poco trasparente, quindi avete poca probabilità di traversare l'ostacolo e di andare dall'altra parte.

Quando la meccanica classica non vede altro modo di lanciare un proiettile al di là della barriera che quello di fornire il proiettile di energia esuberante oppure quello di abbassare la barriera, la meccanica ondulatoria si contenta talvolta di renderla piú trasparente modificandone l'indice di rifrazione o assottigliandola.

Questo problema tipico, che chiameremo del salto della siepe, riguarda l'emissione di elettroni dai metalli e riguarda anche il problema fondamentale per la conoscenza della parte pesante dell'atomo, il nucleo atomico, posto dalla radioattività (Cap. VI).

Le soluzioni che propone la meccanica ondulatoria rendono conto di fatti non comprensibili fin qui, correggono formulazioni incomplete, precisano quantitativamente particolarità che prima sfuggivano all'interpretazione.

Conclusione.

La fisica moderna si è piegata su se stessa e ha concluso nella necessità di rivedere i punti di partenza dei suoi ragionamenti. Ora, questa importante caratteristica critica della fisica moderna è certo stata introdotta per la prima volta dalle relatività di EINSTEIN delle forme superiori. Esse infatti hanno cominciato a sostituire alle figurazioni meccaniche troppo specifiche e

quasi antropomorfe degli enti classici, figurazioni piú generali, meno ipotetiche.

Nella relatività, come nella meccanica di SCHRÖDINGER, le forze scompaiono e sono sostituite da particolari proprietà dello spazio, che l'una teoria chiama deformazioni e l'altra denomina indice di rifrazione. Per non occuparci che della nuova meccanica osserviamo che essa fa dipendere le sue soluzioni da premesse energetiche. I dati energetici sono gli unici che lo sperimentalista può fornire. La nuova meccanica è quindi piú aderente alla realtà dei fenomeni che si osservano, quando pone le basi dei problemi da risolvere.

Nello sviluppo del problema essa è guidata da metodi che spesso non permettono di seguire in modo concreto il fenomeno in istudio dalle sue origini al punto in cui si manifesta nella forma osservabile.

Ma pel rispetto dovuto alla logica rigorosa che ispira il metodo, non ci possiamo lamentare di questo. Tanto piú in quanto è certo che l'eventuale indeterminazione dei principî non è sensibile nelle soluzioni a cui si perviene. Il processo di integrazione, per cui dalle malsicure conoscenze del microcosmo si risale a quelle precise del macrocosmo a noi percepibile, ci presenta le cose precisamente nel modo che è desiderato dallo spirito di necessità realistico e positivo del filosofo naturale.

CAPITOLO V

PAESAGGI ATOMICI

La legge del RITZ. *L'ipotesi del* BOHR. *Le esperienze di* FRANCK *ed* HERTZ. *L'emissione dei raggi X. Il numero atomico e la tavola periodica degli elementi. Il modello dell'atomo nella meccanica ondulatoria. Conclusioni.*

LA CONOSCENZA dei fatti pel fisico non è la fine. ma il principio del viaggio verso le cose prime e piú alte, diceva PLUTARCO.

Per questo esperienza e teoria si completano a vicenda e possono esser coltivate separatamente solo nei periodi come il nostro in cui la grande maturità scientifica e l'enorme massa delle tecniche da conoscere impongono la divisione del lavoro. Se non si avesse questa divisione, si potrebbe anzi sostenere che la pura teoria nella fisica non esiste, finché almeno per teoria intendiamo la ricostruzione sui fatti d'esperienza delle concezioni generali relative all'energia e alla materia, il raggiungimento degli scopi piú alti ai quali allude PLUTARCO.

L'armonia e l'equilibrio del metodo, che è garanzia del valore delle conclusioni a cui esso conduce, impongono una stretta collaborazione fra le due funzioni del ricercatore: quella di analizzare i fenomeni e quella di trarne sintesi generali.

Nulla è forse piú efficace nel mettere in evidenza gli effetti di questa necessaria collabora-

zione quanto il riassumere ciò che si è fatto in questi ultimi anni di teorico e di sperimentale per arrivare alla conoscenza dell'atomo, la parte non piú ultima e non piú indivisibile della materia.

La legge del Ritz.

L'atomo non è piú indivisibile perché lo abbiamo separato in un componente materiale positivo che pesa e in uno costituito solo di cariche elettriche negative. Non è piú la parte ultima, perché anche il componente materiale si può scomporre in elementi distinti.

Il primo problema che ci dobbiamo proporre è quello di sapere come sono congegnate fra loro le due parti principali dell'atomo: la materiale e la elettronica. Di dove potremo ricavare le informazioni necessarie allo scopo? Finché il sistema atomico è in condizioni normali, esso è muto e non rivela nulla di se stesso. Per conoscere il suo temperamento bisogna farlo parlare, bisogna farlo muovere, vederlo vivere, cioè emettere luce e calore.

La soluzione dell'enigma sta dunque nel complesso delle radiazioni che l'atomo manifesta nelle diverse condizioni di eccitazione a cui può essere assoggettato. Il cómpito del fisico si traduce quindi nel raccogliere il maggior numero possibile di notizie spettroscopiche e nell'interpretare queste notizie.

Riferiamoci a un caso particolarissimo. Come

insegna la chimica, l'atomo di idrogeno è il piú leggero di tutti e il piú semplice.

Se chiudiamo un po' di idrogeno molecolare (H_2) in un tubo di vetro munito di elettrodi, cioè di pezzetti di metallo comunicanti con l'esterno, e poi facciamo avvenire una scarica elettrica conveniente, l'idrogeno, separato nei suoi due atomi, diviene luminoso. Se analizziamo la radiazione emessa con lo spettroscopio, troviamo uno spettro di righe relativamente complesso.

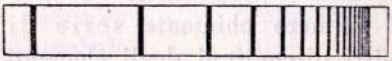


Fig. 37. — Schema dello spettro dell'idrogeno atomico (serie di BALMER).

Alcune di queste righe compaiono nella regione visibile, altre sono nell'ultravioletto e molte ancora giacciono nell'ultrarosso.

Ogni riga corrisponde a una vibrazione luminosa. L'atomo di idrogeno, che è tanto semplice, è dunque capace di vibrare in tanti modi diversi?

Queste vibrazioni non sono tuttavia prive di regolarità. Lo svizzero J. J. BALMER nel 1885 mise in evidenza che le frequenze dello spettro visibile dell'idrogeno obbediscono a un'unica relazione numerica [$\nu = Rc\ (1/k^2 - 1/n^2)$, ove c è la velocità della luce, $R = 109\,678\ \mathrm{cm}^{-1}$ e $k = 2$, mentre n può prendere i valori 3, 4, 5...] (Fig. 37). Questa relazione prevede altre radiazioni, oltre quelle che conosceva il BALMER in corrispon-

denza dei valori piú elevati da dare ad n ed esse sono state osservate parte in laboratorio, parte nelle stelle circondate da questo gas (spettro di assorbimento: Tav. II, *a*).

In seguito T. LYMAN vide che le righe ultraviolette seguono una relazione identica a quella scritta dal BALMER, in cui però $k = 1$ ed $n = 2, 3, 4, \ldots$ Mentre W. RITZ riconobbe che lo spettro infrarosso è pure rappresentato dalla stessa legge, nella quale $k = 3$ ed $n = 4, 5, 6, \ldots$

Si sono cosí trovate quelle che per la loro struttura vennero chiamate serie di righe degli spettri discontinui degli elementi, riproducenti le regolarità caratteristiche delle vibrazioni atomiche.

Piú generalmente il RITZ osservò poi che ogni frequenza emessa da un atomo eccitato è rappresentabile con la differenza di due termini:

$$\nu = T_f - T_v, \qquad (1)$$

di cui il primo in ogni serie è fisso e il secondo invece decresce progressivamente. Il primo o il secondo termine possono comparire in serie diverse, ma il termine fisso in una serie sarà allora termine variabile nell'altra.

Nel trinomio del RITZ si può riassumere il resultato dell'ordinamento dell'immenso materiale raccolto in piú di un cinquantennio di ricerche eseguite con lo spettroscopio. Questa relazione empirica, valida per lo spettro dell'idrogeno, lo è pure, fatte le debite variazioni nella espressione

dei T_f e T_v, per gli spettri meno semplici degli altri elementi. Essa deve esser la chiave che apre le porte dell'atomo.

Non sembra che in un primo tempo questa espressione fosse presa nella dovuta considerazione. Le belle colonne di numeri che forniva l'esame degli spettri, le belle colonne colorate e iridescenti come l'arcobaleno, parvero una cosa complicata e non suggerirono tanto presto l'ispirazione utile per l'interpretazione della struttura atomica.

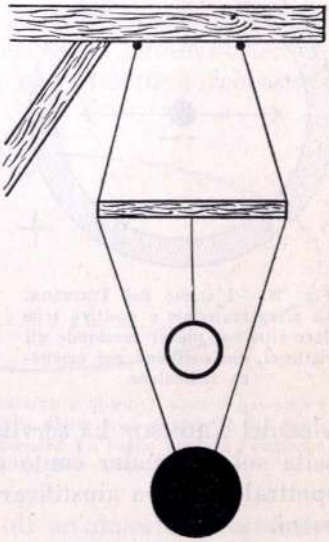


Fig. 38. — Sistema di pendoli accoppiati.

Il pendolo è il primo modello a cui in modo spontaneo ricorreva la mente in quel tempo e le colonne di frequenze dei trattati di spettroscopia facevano pensare all'atomo come a un sistema di pendoli collegati fra loro nelle maniere piú diverse (Fig. 38). Il pendolo naturalmente poté anche ai primi del novecento esser sostituito dall'oscillatore di HERTZ, che lancia intorno a sé onde elettromagnetiche.

Non si allontana da questo concetto fondamentale il primo paesaggio atomico che noi possiamo contemplare nella fisica, quello immaginato da J. J. THOMSON: una sfera materiale positiva contenente gli elettroni, che neutralizzano la carica (Fig. 39). Essi allo interno della sfera oscillano e nello oscillare emettono energia radiante a guisa dell'oscillatore di HERTZ.

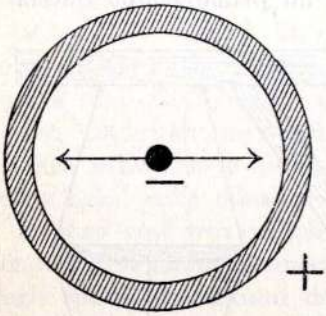


Fig. 39. — L'atomo del THOMSON. La sfera materiale e positiva (che deve ritenersi piena) racchiude gli elettroni, che oscillano per emettere radiazione.

Bisogna riconoscere che la bella idea del THOMSON ha servito poco perché è riuscita solo a render conto di qualche dettaglio spettrale e non a giustificare l'insieme dei fenomeni.

L'ipotesi del Bohr.

Il guaio stava non tanto nel modello atomico quanto nella sua meccanica. Ad ogni modo anche una modificazione del modello poteva esser utile per guidare verso le correzioni da introdurre nella meccanica dell'atomo.

Erano in corso nel 1910 a Cambridge esperienze sulla diffusione di particelle materiali espulse dalle sostanze radioattive nell'interno di

foglie sottili di metalli pesanti (Cap. VI). Per render conto dei resultati che otteneva E. RUTHERFORD, che eseguiva queste esperienze, ammise che l'atomo di un qualunque elemento fosse costituito come il sistema solare. Il RUTHERFORD cioè invertiva la posizione delle parti costituenti l'atomo rispetto al modello del THOMSON. La materia si contraeva in una sferetta piccolissima

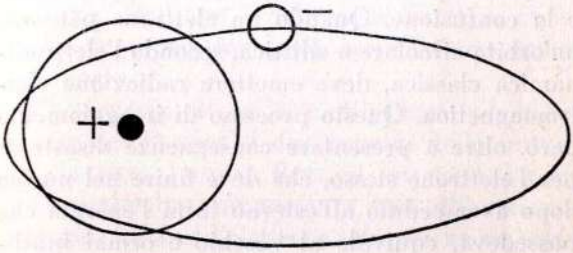


Fig. 40. — L'atomo di RUTHERFORD e BOHR. Il nucleo materiale e positivo è nel fuoco di un'orbita elettronica ellittica. È disegnata pure un'orbita circolare. L'emissione ha luogo quando l'elettrone passa da una ad altra delle orbite possibili.

che stava nel centro di un'atmosfera costituita di elettroni, percorrenti orbite ellittiche piú o meno sviluppate (Fig. 40). La materia o nucleo centrale aveva le funzioni di un piccolo sole che con le forze attrattive, dovute alla sua carica positiva, incantenava a sé i pianetini elettronici.

Questo secondo paesaggio atomico è elegante e suggestivo; esso fu anche felice non solo perché spiegava bene i resultati per cui il RUTHERFORD l'aveva disegnato, ma anche perché con esso il danese Niels BOHR poté nel 1913 rica-

mare variazioni di motivo energetico sulla base della teoria quantistica, già introdotta piú di dieci anni avanti da Max PLANCK e sostenuta da Alberto EINSTEIN.

In effetto il BOHR colpí il punto giusto del problema, perché la sua preoccupazione fu quella di ridurre il nuovo modello a giustificare il principio del RITZ, che introduce l'ordine e la semplicità dove sembrava regnasse il disordine e la confusione. Quando un elettrone percorre un'orbita circolare o ellittica, secondo l'elettrodinamica classica, deve emettere radiazione elettromagnetica. Questo processo di irraggiamento però, oltre a presentare conseguenze disastrose per l'elettrone stesso, che deve finire nel nucleo dopo aver ceduto all'esterno tutta l'energia che possedeva, equivale al vecchio e ormai inutilmente provato sistema pendolare. Esso non giustifica tutti gli spettri degli elementi e le loro regolarità.

Il BOHR allora coraggiosamente taglia corto a questa difficoltà; rigetta per la prima volta un concetto classico per l'interpretazione di fatti atomici e ammette che durante le sue evoluzioni orbitali l'elettrone non emani energia radiante. L'orbita è uno stato stazionario per l'elettrone nell'atomo e niente piú. Percorrere una certa orbita è il modo di riposare dell'elettrone dalla fatica di emettere o assorbire radiazioni elettromagnetiche.

Ritorniamo all'atomo di idrogeno, che in questa concezione ha un solo elettrone intorno al

nucleo positivo o protone. Nel suo stato normale l'elettrone dell'atomo di idrogeno sta su una certa traiettoria circolare.

Ma l'atomo può essere eccitato per assorbimento d'energia. Che cosa significa ciò pel BOHR? Significa usare quest'energia per portare l'elettrone su un'orbita diversa, piú grande della prima per esempio o almeno di forma diversa dalla prima. Ma la nuova orbita non è arbitraria, cioè non è arbitraria l'energia che si può usare, per far compiere all'atomo questo passaggio.

Osserviamo che se si moltiplicano per h, costante del PLANCK, i due termini delle formule di BALMER, LYMAN, RITZ, il prodotto $h\nu$ del primo membro rappresenta una differenza di energie. Ebbene l'elettrone, che sta su un'orbita la cui energia eguaglia il primo termine delle formule di BALMER, LYMAN, RITZ moltiplicato per h, quando assorbe il quanto $h\nu$ sale sull'orbita la cui energia eguaglia il secondo termine. Altre orbite non esistono nell'atomo di idrogeno o, se esistono, l'elettrone le ignora, non sa che farsene nel momento in cui sbriga le sue faccende di assorbimento ed emissione.

Nella nuova orbita infatti l'elettrone può permanere solo poco tempo, non piú di un centomilionesimo di secondo, perché in essa il sistema atomico non soddisfa piú alle condizioni di equilibrio meccanico, che corrisponde al minimo di energia totale. Esso quindi scende su un'orbita piú bassa o direttamente ricade sull'orbita di

partenza, la piú stabile. L'energia che cosí avanza è ceduta all'esterno sotto forma luminosa, e si ha l'emissione.

Quello che vale per l'idrogeno si ripete per gli altri atomi piú complessi, pur di separare dall'insieme dei loro elettroni quello cui spettano funzioni ottiche. Esso presso l'atomo normale è sempre da scegliere fra gli elettroni meno legati al nucleo, cioè fra gli stessi che dànno luogo alle reazioni chimiche.

L'emissione di radiazione elettromagnetica di una determinata frequenza, cosí come il suo assorbimento, sono ridotti dunque al salto di un elettrone atomico fra due orbite di diversa energia e la relazione numerica che misura questo salto in unità energetiche è in generale la relazione del Ritz in cui i due termini sono moltiplicati per h:

$$h\nu = h(T_f - T_v) = E_f - E_v \qquad (2)$$

Con E_f ed E_v indichiamo appunto le energie delle orbite iniziale e finale del salto elettronico, che dà luogo a irraggiamento di frequenza ν.

Si vede che il Bohr in sostanza ha tradotto un fatto empirico mediante l'intuizione quantistica del Planck. Il primo membro della relazione (2), che ormai diremo del Bohr, è infatti un quanto.

Le esperienze di Franck ed Hertz.

Il primo lavoro del Bohr ha dato la via a numerose ricerche teoriche dirette a interpretare tutte le particolarità degli spettri meno semplici

di quello dell'idrogeno. Ma non meno importante è il fatto che esso ha suscitato esperienze atte a mettere alla prova quello che è il fondamento della teoria del BOHR e cioè: le radiazioni emesse o assorbite da un atomo provengono dalla transizione dell'elettrone ottico da un livello energetico a un

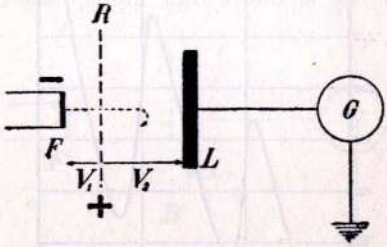


Fig. 41. — Disposizione sperimentale per lo studio dei potenziali critici per mezzo della corrente elettronica diretta fra il filamento incandescente *F* e la piastra *L*. *G* è il galvanometro rivelatore della corrente ed è collegato con la terra. La rete *R* serve solo per la difesa di *L* da elettroni troppo lenti.

altro e nell'atomo esiste appunto una successione discontinua di livelli energetici che possono essere assunti dagli elettroni che in esso si trovano.

Le esperienze iniziate da FRANCK ed HERTZ hanno appunto confermato questo modo di vedere. FRANCK ed HERTZ inviavano una corrente di elettroni lenti e di velocità crescente in un vapore a bassa pressione, poniamo ad esempio, di mercurio (Fig. 41). Man mano che la velocità

elettronica si allontanava dallo zero, la corrente fra il filo incandescente produttore degli elettroni e la superficie di una lastrina ad esso opposta avrebbe dovuto crescere progressivamente. In-

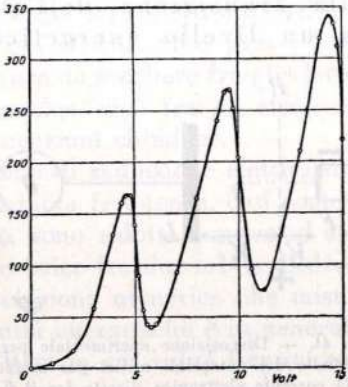


Fig. 42. — Potenziali critici del mercurio ottenuti da FRANCH ed HERTZ col metodo della corrente diretta. Essi corrispondono agli abbassamenti della curva dell'intensità di corrente data per valori crescenti dei potenziali acceleratori degli elettroni.

vece FRANCK ed HERTZ hanno trovato che la corrente, ha l'andamento indicato nella figura 42. Essa cioè subisce di tanto in tanto abbassamenti improvvisi. Questi abbassamenti corrispondono a valori del potenziale acceleratore degli elettroni per cui la loro energia eguaglia uno dei termini $E_f - E_v$ ottenuti spettroscopicamente pel mercurio.

Gli elettroni che raggiungono la placca per valori determinati dalla loro velocità diminuiscono cioè di numero. Essi si perdono per la strada, perché perdono l'energia occorrente ad arrivare alla placca. Dove va tale energia? Ma gli elettroni traversano un vapore; essi possono urtare contro gli atomi di questo. Negli eventuali urti essi cedono agli atomi la loro energia.

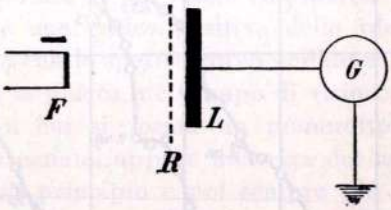


Fig. 43. — Disposizione schematica per lo studio dei potenziali critici con il metodo indiretto.

E, come si vede, la cedono solo quando essa serve all'atomo, quando cioè ha raggiunto il valore sufficiente ad elevare uno degli elettroni atomici dal livello normale a livello energetico superiore; non poco prima, non poco dopo.

Resultato egualmente suggestivo FRANCK ed HERTZ hanno ottenuto con altra disposizione (Fig. 43). Fra il filamento che produce elettroni e la lastra ricevitrice è interposta una rete metallica. Il potenziale acceleratore degli elettroni sta fra la rete e il filo; fra la rete e la placca si ha invece un potenziale ritardatore. Cosí

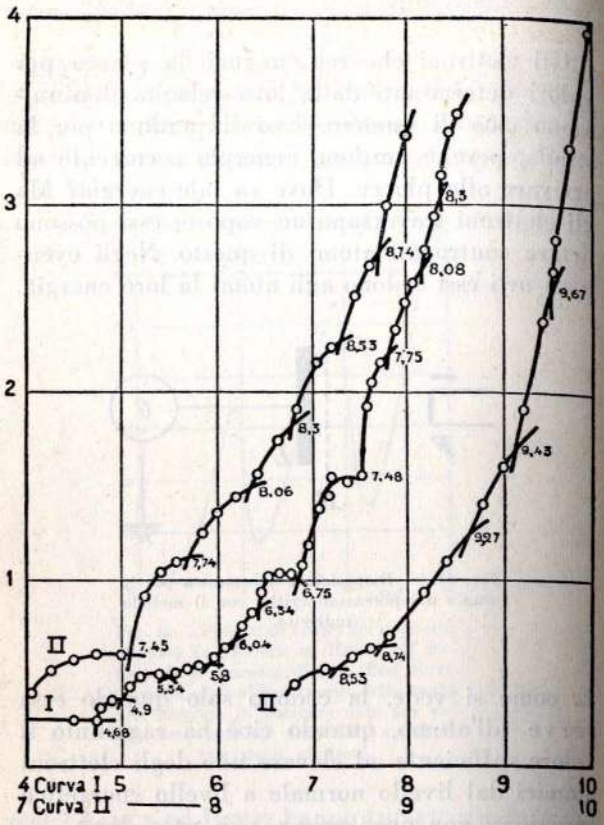


Fig. 44. — Potenziali critici del mercurio ottenuti col metodo indiretto. Essi corrispondono ai gradini successivi delle curve.

nessun elettrone emesso dal filo può giungere alla placca. Se questa rivela una carica elettrica, la deve ricevere da causa diversa dagli elettroni uscenti dal filo incandescente. Con tale disposizione e con vapore di mercurio nel

tubo, i ricercatori hanno ottenuto la curva della figura 44; in essa sull'asse orizzontale stanno le tensioni acceleratrici e sul verticale la corrente che traversava il galvanometro connesso alla placca.

Si vede che di tanto in tanto l'aumento di questa corrente si arresta e forma un pianerottolo. Di piú questa corrente ha senso inverso da quella portata da un fascio elettronico. Essa rivela cioè una carica positiva della placca. Se si guarda con lo spettroscopio nell'intervallo fra la rete e la placca, nel campo di visione, al momento in cui si forma un pianerottolo della curva disegnata, appare una riga del mercurio, debole da principio e poi sempre piú intensa. È questa radiazione, che determina l'effetto fotoelettrico nel metallo della placca e quindi lo carica positivamente.

Anche da questa prova resulta dunque che la eccitazione atomica ottenuta per bombardamento elettronico procede per gradini.

Il vecchio moto, relativo alla affermata continuità dei processi naturali, *natura non facit saltus*, è da mettere a riposo.

L'emissione dei raggi X.

Sotto l'ispirazione del principio del Ritz interpretato dal Bohr è stato guardato con occhi nuovi anche tutto il materiale spettroscopico catalogato e nuove e piú illuminate ricerche sono state eseguite per completarlo. Cosí di ogni

atomo si sono ricostruiti i livelli energetici che gli elettroni ottici possono occupare quando assorbono energia. Nella figura 45 è lo schema dei livelli propri dell'idrogeno atomico.

Nello stesso anno 1913, reso celebre dal BOHR, nasceva anche la spettroscopia d'emissione e di assorbimento dei raggi X. La frequenza dei raggi X è elevatissima, tantoché per produrli occorre disporre di tensioni dell'ordine di molte migliaia di volt. I raggi X non possono quindi nascere dove nasce la luce ordinaria. Non possono essi esser prodotti nella parte superficiale dell'atomo, ma debbono provenire da quella piú interna dove stanno gli elettroni piú strettamente legati al nucleo e che per questa ragione vengono rimossi dall'atomo, o in esso spostati, solo in seguito a un lavoro molto grande. Questi elettroni non prendono parte che in modo secondario ai processi ottici propriamente detti e nemmeno intervengono direttamente in quelli chimici, in cui sono messe in gioco energie relativamente piccole.

L'atomo di idrogeno che possiede un solo elettrone non dà luogo a raggi X, a meno che come tali si vogliano considerare i suoi raggi ultravioletti. Ma effettivamente non sarebbe esatto fare questa identificazione.

La sistematica dei raggi X caratteristici degli elementi, quelli che presentano cioè spettro di righe, ha rivelato che nella regione delle alte frequenze vale pure il principio del RITZ. An-

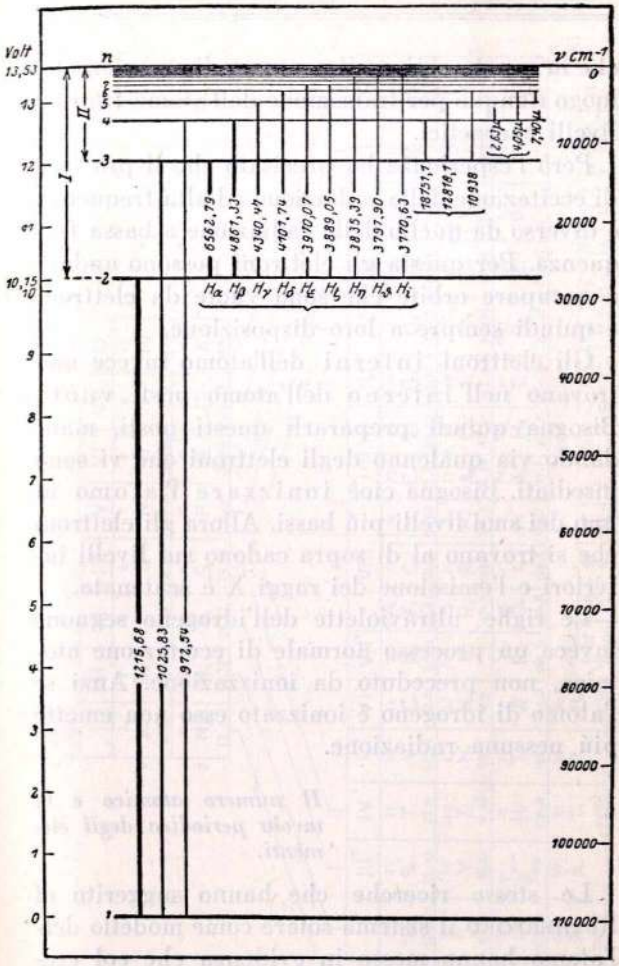


Fig. 45. — Schema dei livelli energetici dell'idrogeno atomico. Sulla verticale sono riportati i valori dei livelli a partire dalla superficie dell'atomo da una parte in volt e dall'altra in frequenze ($1/\lambda$). Le linee congiungenti i livelli indicano le transizioni possibili fra di essi e rappresentano quindi le radiazioni dell'idrogeno atomico. Le singole lunghezze d'onda sono indicate in 10^{-8} cm.

che in questa regione il processo di emissione ha luogo dunque per transizione dell'atomo fra due livelli energetici.

Però l'esperienza ha precisato che il processo di eccitazione della radiazione ad alta frequenza è diverso da quello della radiazione a bassa frequenza. Per questa gli elettroni possono andare a occupare orbite che sono vuote da elettroni e quindi sempre a loro disposizione.

Gli elettroni interni dell'atomo invece non trovano nell'interno dell'atomo posti vuoti. Bisogna quindi prepararli questi posti, mandando via qualcuno degli elettroni che vi sono insediati. Bisogna cioè ionizzare l'atomo in uno dei suoi livelli piú bassi. Allora gli elettroni che si trovano al di sopra cadono sui livelli inferiori e l'emissione dei raggi X è scatenata.

Le righe ultraviolette dell'idrogeno seguono invece un processo normale di eccitazione atomica, non preceduto da ionizzazione. Anzi se l'atomo di idrogeno è ionizzato esso non emette piú nessuna radiazione.

Il numero atomico e la tavola periodica degli elementi.

Le stesse ricerche che hanno suggerito al RUTHERFORD il sistema solare come modello dell'atomo hanno messo in evidenza che col crescere del peso atomico cresce il numero delle cariche positive nucleari e quindi cresce il numero degli elettroni atomici che le neutraliz-

	I	II	III	IV	V	VI	VII	O
1	1 H 1.008							2 He 3.99
2	3 Li 6.94	4 Be 9.02	5 B 10.82	6 C 12.00	7 N 14.008	8 O 16.000	9 F 19.00	10 Ne 20.183
3	11 Na 23	12 Mg 24.32	13 Al 26.97	14 Si 28.06	15 P 31.02	16 S 32.06	17 Cl 35.46	18 Ar 39.944

	I'	II'	III'	IV'	V'	VI'	VII'	VIII			I	II	III	IV	V	VI	VII	O
4	19 K 39.10	20 Ca 40.07	21 Sc 45.10	22 Ti 47.9	23 V 50.95	24 Cr 52.01	25 Mn 54.93	26 Fe 55.84	27 Co 58.94	28 Ni 58.69	29 Cu 63.57	30 Zn 65.38	31 Ga 69.72	32 Ge 72.60	33 As 74.93	34 Se 79.2	35 Br 79.92	36 Kr 82.90
5	37 Rb 85.44	38 Sr 87.63	39 Y 88.92	40 Zr 91.22	41 Nb 93.3	42 Mo 96.0	43 Ma	44 Ru 101.7	45 Rh 102.9	46 Pd 106.7	47 Ag 107.88	48 Cd 112.41	49 In 114.8	50 Sn 118.70	51 Sb 121.76	52 Te 127.5	53 J 126.932	54 X 130.2
6	55 Cs 132.81	56 Ba 137.36	Terre Rare	72 Hf 178.6	73 Ta 181.4	74 W 184.0	75 Re 186.31	76 Os 190.8	77 Ir 193.1	78 Pt 195.2	79 Au 197.2	80 Hg 200.6	81 Tl 204.39	82 Pb 207.22	83 Bi 209.0	84 Po 210	85	86 Em 222 —
7	87	88 Ra 225.97	89 Ac	90 Th 232.12	91 Pa	92 Ur 238.14												

57 La 138.9	58 Ce 140.13	59 Pr 140.9	60 Nd 144.3	61 Fr	62 Sm 150.4	63 Eu 152.0	64 Gd 157.3	65 Tb 159.2	66 Dy 162.5	67 Ho 163.5	68 Er 167.6	69 Tu 169.4	70 Yb 173.5	71 Lu 175.0

Sistema periodico degli elementi.

zano. Dall'idrogeno con un solo elettrone si arriva all'uranio che ne ha novantadue.

La spettroscopia dei raggi X è stata utilissima per la classificazione dei livelli su cui gli elettroni dell'atomo sono distribuiti. Ai 92 elettroni dell'uranio per esempio non corrispondono infatti 92 livelli diversi, ma solo 22 (Fig. 46). Alcuni elettroni si aggruppano quindi su livelli identici. I livelli che hanno lo stesso numero d'ordine in atomi successivi, hanno le medesime caratteristiche pur possedendo valore energetico differente, e obbediscono a una legge che ha un notevole interesse.

Fin dal 1865 il fisico russo MENDELEJEFF aveva osservato che gli elementi conosciuti al suo tempo, disposti uno di seguito all'altro nell'ordine indicato dal loro peso atomico, presentavano periodicità di proprietà chimiche e fisiche. Questa osservazione diede luogo alla nota classificazione degli elementi per colonne corrispondenti ai valori della valenza (Tav. VIII).

Da essa si dedusse che alcuni elementi non erano conosciuti, mentre le loro proprietà erano prevedibili e ben determinate. Si vide anche che l'ordine di alcuni elementi, stabilito dal peso atomico, avrebbe dovuto per le loro proprietà chimiche essere invertito.

Nella concezione atomica del RUTHERFORD grande importanza acquistava il numero delle cariche positive possedute dal nucleo. I calcoli del BOHR confermavano questa importanza. Ora, sulla base di un'osservazione fatta nel 1914

da Carlo MOSELEY, si poté mettere in evidenza che questo numero assume in effetto una fun-

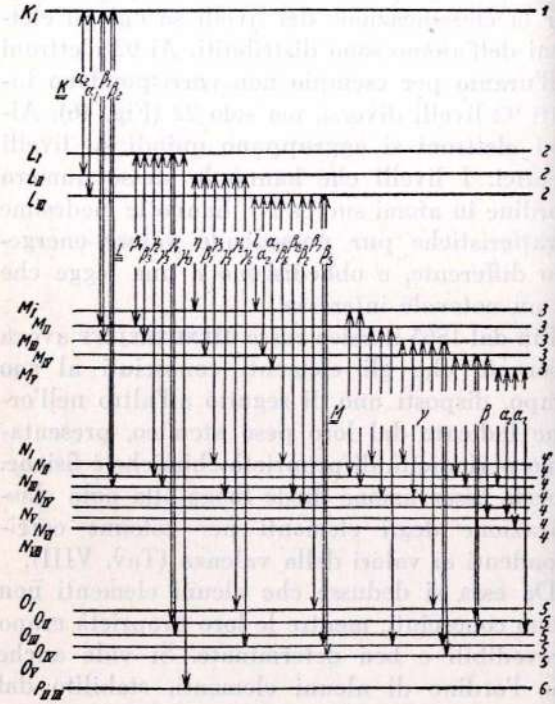


Fig. 46. — Schema dei livelli interni dell'uranio. In alto è il livello (*K*) piú prossimo al nucleo. Le linee a doppia freccia rappresentano le transizioni possibili fra di essi e corrispondono quindi alle radiazioni X dell'uranio.

zione fondamentale nell'ordinamento degli elementi. Se su un asse si porta la radice quadrata dell'energia dei livelli atomici interni a ugual

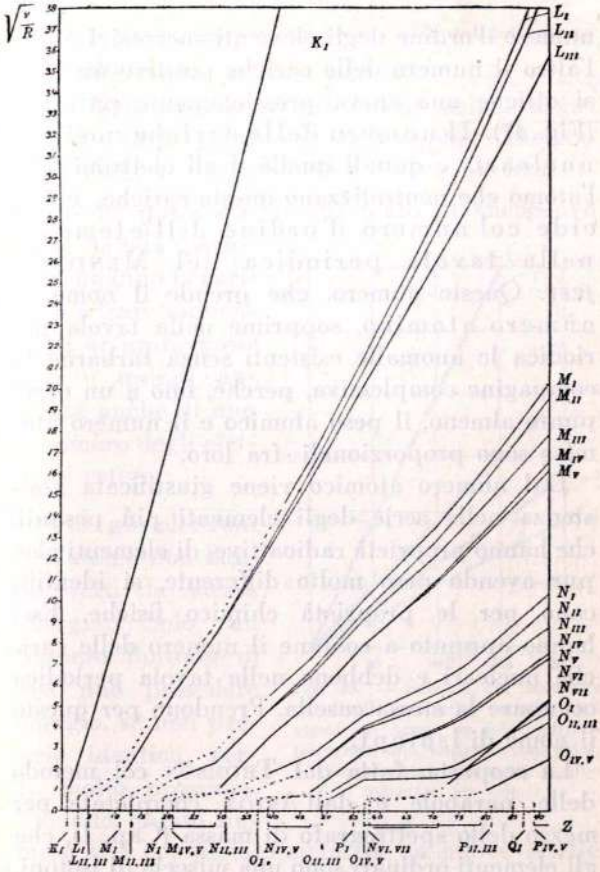


Fig. 47. — Schema del MOSELEY dei livelli atomici degli elementi della tavola periodica. Sull'asse orizzontale sono portati i numeri atomici e sul verticale le radici quadre delle energie dei livelli dei singoli atomi. Sono congiunti fra loro da rette o linee spezzate i valori dei livelli omonimi (indicazione lungo il margine a sinistra dello schema).

numero d'ordine degli elementi successivi e sull'altro il numero delle cariche positive nucleari si ottiene una curva prossimamente rettilinea (Fig. 47). Il numero delle cariche positive nucleari, e quindi quello degli elettroni dell'atomo che neutralizzano queste cariche, coincide col numero d'ordine dell'elemento nella tavola periodica del MENDELEJEFF. Questo numero, che prende il nome di numero atomico, sopprime nella tavola periodica le anomalie esistenti senza turbarne la compagine complessiva, perché, fino a un certo punto almeno, il peso atomico e il numero atomico sono proporzionali fra loro.

Dal numero atomico viene giustificata l'esistenza nella serie degli elementi piú pesanti, che hanno proprietà radioattive, di elementi che, pur avendo peso molto differente, si identificano per le proprietà chimico fisiche. Essi hanno appunto a comune il numero delle cariche nucleari e debbono nella tavola periodica occupare la stessa casella. Prendono per questo il nome di isotopi.

La scoperta, fatta dal THOMSON col metodo delle parabole e dall'ASTON completata per mezzo dello spettrografo di massa (Cap. I), che gli elementi ordinari sono una miscela di isotopi, conferma il valore del numero atomico come parametro ordinatore della tavola degli elementi e come causa determinante della loro formazione.

Si possono quindi riassumere cosí, in defini-

tiva, i principî che presiedono alla costituzione degli atomi:

a) ogni atomo possiede tante cariche negative elementari intorno al nucleo quante bastano a neutralizzare le cariche positive nucleari;

b) si passa da un elemento al successivo della tavola periodica quando la carica nucleare aumenta di un'unità positiva e quindi aumenta anche di uno il numero degli elettroni esterni;

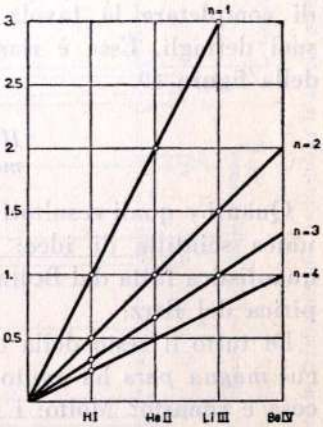


Fig. 48. — Schema del MOSELEY pei livelli energetici esterni degli atomi che hanno un solo elettrone (idrogeno, elio, ionizzato una volta, litio doppiamente ionizzato, berillio ionizzato tre volte).

c) gli elettroni dell'atomo non hanno tutti la stessa energia. Solo un numero limitato di essi può possedere energia, se non proprio identica, certo molto prossima. Quando questo numero si è completato si inizia un nuovo livello energetico;

d) i livelli successivi hanno lo stesso carattere presso tutti gli atomi; essi si differenziano solo pel valore dell'energia. La differenza esistente fra atomi leggeri e atomi pesanti consiste

nel fatto che non tutti i livelli presso gli atomi leggeri sono occupati, mentre i piú pesanti hanno livelli completi di elettroni.

La conoscenza di una legge analoga a quella del MOSELEY, che il MILLIKAN (Fig. 48) ha messo in evidenza pei livelli esterni di atomi a ugual numero di elettroni (isoelettronici) ha permesso di completare la tavola periodica anche nei suoi dettagli. Essa è riassunta con lo schema della figura 49.

Il modello dell'atomo nella meccanica ondulatoria.

Quanti e quali resultati sono scaturiti da una unica scintilla di idee: dalla interpretazione quantistica fatta dal BOHR della espressione empirica del RITZ!

Di tutto il resto della costruzione teorica, in cui *magna pars* ha avuto Arnold SOMMERFELD, cosa è rimasto? Molto: i resultati numerici dei calcoli, il significato dei numeri che servono a classificare i livelli energetici.... Ma le orbite? Il simpatico sistema solare del RUTHERFORD? Quello l'esperienza non lo ha mai visto sul serio. Quello è fantasia teorica e come tale deve passare di moda alla guisa della foggia dei cappellini da signora. Quello era uno strumento di calcolo che un bel giorno W. HEISENBERG ha dichiarato inadatto concettualmente allo scopo da raggiungere. Se non si può conoscere la posizione e la quantità di moto di un elettrone a

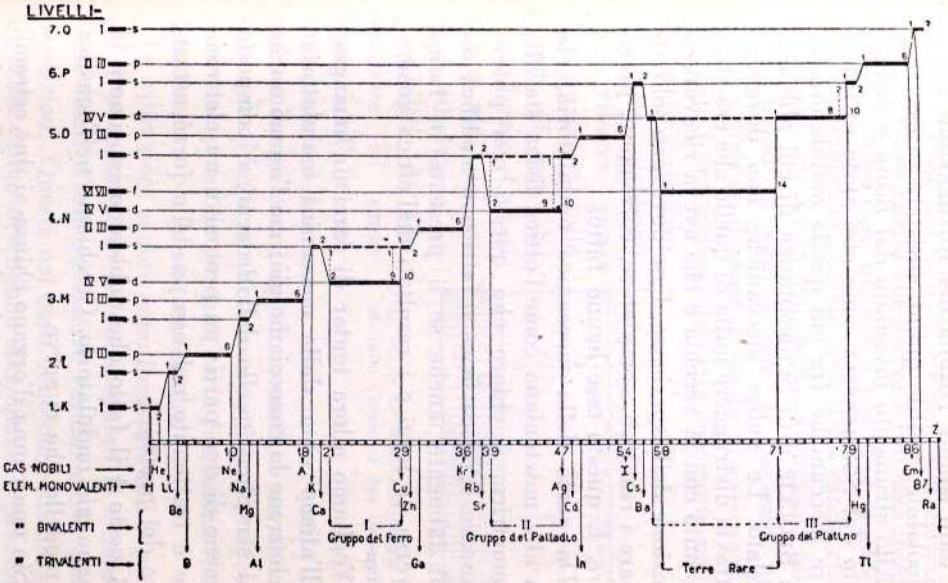


Fig. 49. — Schema che illustra la formazione dei livelli lungo la tavola periodica degli elementi.

un dato istante l'orbita del RUTHERFORD non è calcolabile; inutile quindi insistere in essa.

Allo strumento inventato dal BOHR e sviluppato dal SOMMERFELD sono cosí state sostituite altre meccaniche fra cui quella ondulatoria di DE BROGLIE e di SCHRÖDINGER di cui abbiamo parlato. Le nuove meccaniche non dovevano tuttavia distruggere nulla di quello che era stato ottenuto con la vecchia e che aveva ricevuto la sanzione dell'esperienza. Esse dovevano solo affinare i resultati, completare, correggere, precisare. E questo esse hanno fatto.

Da parte della meccanica ondulatoria, che sta alla newtoniana cóme l'ottica fisica sta alla geometrica, è chiaro che questo non poteva mancare. L'ottica fisica infatti non modifica sostanzialmente, anche se li presenta in forma diversa, le leggi e i resultati dell'ottica geometrica.

Vogliamo allora tentar di farci un'immagine dell'atomo visto dalla meccanica ondulatoria? L'elettrone lo conosciamo già; ma l'atomo anche piú semplice, quello dell'idrogeno, è composto almeno di due parti: un protone e un elettrone che è trattenuto nel campo delle forze attrattive del protone.

Questo è il fatto che dobbiamo esprimere in linguaggio ondulatorio. Cerchiamo nell'acustica il modello che ci serve.

Sia una canna d'organo chiusa ai due estremi. In essa si propaghi un'onda sonora. Quest'onda parte dal fondo della canna, raggiunge la

parete dirimpetto e lí si riflette. Nel tornare indietro trova l'onda che arriva e con essa interferisce. Forma cosí, quando è possibile, quel sistema di vibrazioni nell'interno della canna che, per essere sempre in ogni punto alimentato allo stesso modo in ogni istante, si conserva nel tempo e prende il nome di onde stazionarie (Fig. 50). I due estremi dell'aria contenuta nella canna in particolare non debbono mai vibrare, perché poggiano sulle pareti di essa che sono ferme. Qui si hanno cioè dei nodi di vibrazione. La possibilità di formazione di onde stazionarie in una data canna è limitata a certe onde; quelle la cui semilunghezza è eguale, o metà, o un terzo, ecc., della lunghezza della canna (Fig. 51). Questo è cioè possibile per una certa frequenza fondamentale e per le sue armoniche.

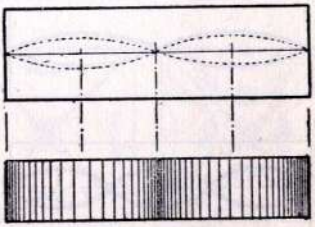


Fig. 50. — Le onde stazionarie in un tubo chiuso ai due estremi.

Le vibrazioni sonore sono longitudinali e perciò il propagarsi di un'onda sonora determina negli strati d'aria successive rarefazioni e condensazioni. Queste nel caso delle onde stazionarie della canna divengono stazionarie e precisamente, dove l'aria non si sposta mai, si avranno condensazioni, dove invece si sposta si verifiche-

ranno rarefazioni. Nei nodi di spostamento si avrà densità massima e nei ventri di spostamento nodi di densità, cioè densità minima.

Possiamo dire che tutto questo rappresenta le condizioni perché un sistema di onde rimanga chiuso in una scatola.

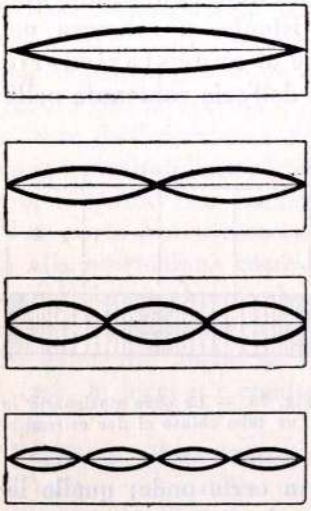


Fig. 51. — Alcune delle lunghezze d'onda per cui è possibile la formazione di onde stazionarie in un medesimo tubo.

Gli elettroni conviventi nell'atomo sono come onde chiuse in una scatola. I limiti della scatola sono determinati dalle forze di attrazione del nucleo, che non permette all' elettrone di allontanarsi da esso. Queste forze costituiscono le pareti contro cui l'elettrone urta e su cui si riflette. La condizione perché un elettrone possa star chiuso nella scatola atomica, è che in essa l'elettrone crei onde stazionarie. Solo quindi se gli elettroni posseggono certe lunghezze d'onda possono rimanere nell'atomo. Possedere certe lunghezze d'onda significa per l'elettrone possedere certe energie (Cap. III e Cap. IV) che si succedono con discontinuità, cosí come

si succedono con discontinuità le lunghezze d'onda degli armonici di una canna d'organo.

La lunghezza d'onda di un elettrone è determinata solo dalla sua energia e a un elettrone si può fornire l'energia che si vuole. Per stare nell'atomo egli sceglierà quindi la propria energia, quella che conviene alle dimensioni della "scatola", alle forze cioè cui viene assoggettato.

Presso atomi complessi queste forze saranno

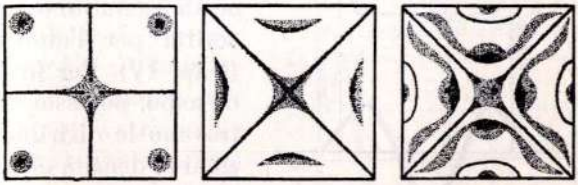


Fig. 52. — Onde stazionarie su lastre metalliche, messe in evidenza con sabbia.

determinate oltre che dal nucleo anche dagli altri elettroni presenti. Descrivere la permanenza di piú elettroni nell'atomo sarà quindi meno semplice che descrivere il formarsi di onde stazionarie in un tubo. In questo caso possiamo come modello prendere piuttosto le figure di onde stazionarie che si ottengono gettando della sabbia sopra lastre di metallo sfregate con le corde di un arco da violino. Sono le cosí dette figure di CHLADNI, un fisico indiano che ci si è divertito intorno al 1785. La sabbia si addensa nei nodi di vibrazione prendendo forme sva-

riate a seconda del modo di distribuzione delle onde elastiche propagantesi nel metallo (Fig. 52).

Anche nell'atomo ricco di elettroni si debbono avere nodi e ventri di densità, come sulle lastre dello CHLADNI, come nella scatola in cui si propaga l'onda sonora.

La posizione di questi rispetto al centro dell'atomo si calcola mediante la funzione Ψ della equazione di SCHRÖDINGER scritta per l'atomo (Cap. IV). Per ioni di sodio, potassio, si trovano le distribuzioni di densità elettronica rappresentate nella figura 54. Queste curve di distribuzione sono state confermate mediante esperienze di diffusione dei raggi X nella materia.

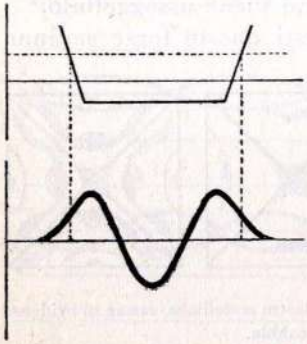


Fig. 53. — Onde stazionarie fra due barriere di potenziale (atomo).

È evidente che le regioni ove sono i ventri di densità corrispondono alle regioni ove si addensano le antiche orbite stazionarie del BOHR occupate dagli elettroni. Se non avessimo quindi i dati spettroscopici, il nuovo resultato basterebbe a concludere in favore della distribuzione per gruppi diversamente numerosi degli elettroni atomici.

Il modello offerto dalla meccanica ondulatoria

per la struttura atomica è di un valore concettuale grandissimo.

La formazione di onde stazionarie nella canna d'organo come sulle lastre dello CHLADNI è la conseguenza di relazioni soddisfacenti a condizioni di continuità. A condizioni di continuità soddisfa l'equazione di SCHRÖDINGER che giustifica la formazione di onde stazionarie elettroniche nell'atomo. L'assorbimento o l'emissione dell'energia radiante corrisponde al passaggio del sistema atomico da un sistema di onde stazionarie a un altro in cui l'atomo possiede energia diversa. Il salto elettronico responsabile delle manifestazioni energetiche del sistema atomico è dunque pure una conseguenza diretta di relazioni a cui sono estranee in origine le premesse quantistiche.

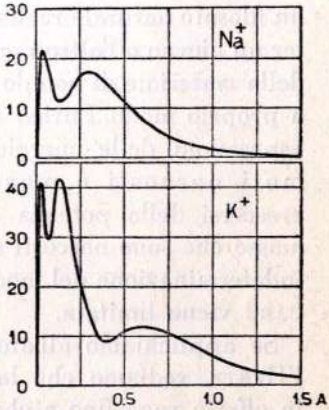


Fig. 54. — La distribuzione della densità elettronica in Na^+ e K^+. Sull'asse orizzontale sono portate le distanze dal centro del nucleo in unità Å (10^{-8} cm).

Quello che aveva di ostico il quantismo del PLANCK e di artificioso quello del BOHR è eliminato dunque dalla concezione ondulatoria dei corpuscoli.

Conclusioni.

Enrico POINCARÉ aveva affermato nel 1894 che se di un sistema si conoscono solo le espressioni delle energie si può in infiniti modi costruirne un modello. Enrico HERTZ ha corretto questo modo di vedere alquanto sconfortante per un filosofo naturale realista, cioè convinto di poter un giorno o l'altro raggiungere la conoscenza della materia e di non doversela sempre figurare a proprio modo. Enrico HERTZ ha detto che le espressioni delle energie sono determinate da moti nascosti e masse nascoste. Coll'accrescersi della potenza d'indagine i moti e le masse che sono nascosti si palesano; e allora la indeterminazione del modello prevista dal POINCARÉ viene limitata.

Se applichiamo all'atomo la previsione dell'HERTZ, vediamo che la sua struttura rimane in effetto vaga fino a che in esso non viene individuato l'elettrone. Oscillatore dell'HERTZ lo era anche prima, ma poteva anche esser pensato come un sistema di conduttori. La conoscenza dell'elettrone dà luogo all'atomo del THOMSON e le reazioni fra particelle α e materia a quello del RUTHERFORD.

La massa nascosta è rivelata, il principio del RITZ rivela al BOHR il moto nascosto.

Orbite o ventri di densità, non ha ormai importanza. La teoria di BOHR e SOMMERFELD è stata messa in disparte, dopo tutti i servigi che ha reso alla fisica atomica, solo per impostare

meglio l'interpretazione dei fatti sperimentali e per non innestare in essi inutili e dannose illazioni.

Ma l'atomo dello sperimentalista è nella sua parte imponderale descritto con soddisfazione e relativa completezza. Il realismo permanente del filosofo naturale, confortato dall'idealismo transitorio del teorico, ha raggiunto una visione forse non deformata della struttura e delle manifestazioni energetiche del microcosmo atomico.

CAPITOLO VI

LA RADIOATTIVITÀ

La scoperta delle radioattività. La natura delle radiazioni emesse dai corpi radioattivi. La sede del processo radioattivo. Il "caso" nei processi radioattivi. Il diametro nucleare. L'energia nucleare e la barriera di potenziale. Il meccanismo delle trasmutazioni spontanee degli elementi. I raggi γ il problema dei raggi β.

DURANTE lo sviluppo di una scienza avviene spesso che la scoperta di un fenomeno, rinnovando gli indirizzi della ricerca, apra allo sguardo orizzonti che non erano stati avanti neppure sospettati. Si direbbe che i fatti naturali siano concatenati fra loro da anelli invisibili, sicchè la rivelazione di uno porta con sé quella di altri non affini al primo.

Cosí la scoperta dei raggi X ha avviato i fisici verso la conoscenza delle proprietà radioattive degli elementi pesanti, che hanno sconvolto la concezione dell'indistruttibilità degli atomi e imposto all'attenzione il mistero della loro nascita e della loro morte.

La scoperta della radioattività.

Il 26 gennaio 1896, Enrico POINCARÉ presentava all'Accademia delle Scienze di Parigi le prime radiografie ottenute dal RÖNTGEN coi raggi X; alla fine della comunicazione Enrico BECQUEREL domandò quale fosse precisamente la regione del tubo di scarica dalla quale venivano emessi i nuovi raggi. Gli fu risposto che veni-

vano emessi dalla parete di vetro, nella porzione resa fluorescente dall'urto dei raggi catodici. Notiamo che i primi tubi adoperati dal RÖNTGEN non erano forniti di anticatodo metallico.

Dalla discussione del fatto si concluse che era necessario indagare se il fenomeno della fluorescenza fosse anche in altri casi accompagnato da emissione di raggi X.

Il BECQUEREL aveva studiato già prima la fluorescenza dei sali di uranile ed aveva potuto stabilire con sicurezza che il fenomeno non è causato da impurezze, ma è dovuto alle caratteristiche costitutive di questi sali. Scelse perciò tali sostanze fluorescenti per iniziare l'indagine.

Su una lastra fotografica completamente avvolta in carta nera egli adagiò una laminetta di alluminio di 2 mm di spessore e sopra di essa posò alcuni cristallini di solfato doppio di uranile e potassio. Fermò poi tutto in un torchietto che espose al sole per una giornata intera. Al momento dello sviluppo della lastra trovò traccie di annerimento in corrispondenza della posizione occupata dalle lamelle fluorescenti.

L'esperienza fu ripetuta parecchie volte sempre col medesimo resultato. Quindi sembrava veramente che la fluorescenza dei sali di uranile fosse accompagnata da una radiazione capace di attraversare lo spessore di 2 mm di alluminio, come i raggi X.

Ma l'equivoco doveva presto essere eliminato; presto, per la fine intuizione del celebre fisico,

ma anche col contributo del caso, doveva avvenire la grande scoperta.

Mentre ripeteva le sue esperienze capitò al BECQUEREL una giornata di cielo coperto; il dispositivo preparato al modo solito fu tenuto rinchiuso in un cassetto in attesa del sole. Passarono tre giorni nuvolosi e il quarto giorno il BECQUEREL si apprestava ad esporre al sole lastra e cristalli, quando gli venne in mente di sostituir prima la lastra vecchia con altra piú fresca.

E nel dubbio che qualche cosa fosse avvenuto anche in assenza di eccitazione solare sviluppò la lastra vecchia. Agli occhi attoniti di Enrico BECQUEREL apparve cosí l'impressione netta delle lamelle cristalline sullo strato sensibile!

Questo fatto era ben strano. Era proprio dovuto a raggi X? Quando si producono raggi X la fluorescenza del vetro è preceduta da urto di elettroni contro di esso. Presso i sali di uranile tenuti al buio manca il bombardamento elettronico e anche la fluorescenza.

Una causa del fenomeno doveva tuttavia trovarsi. Il BECQUEREL pensò allora che esistesse nell'atmosfera una radiazione invisibile capace di produrre l'eccitazione dei sali di uranile. Ma le prove eseguite proteggendo tutto con forti spessori di piombo non portarono nessuna variazione nell'effetto di detti sali sulla lastra.

Il BECQUEREL dovette arrendersi all'evidenza; i sali d'uranio emettevano radiazioni che non provenivano da eccitazione esterna, sembra-

vano perciò sfidare il principio dell'impossibilità del moto perpetuo.

Il BECQUEREL si accorse in seguito che la nuova radiazione non solo era capace di impressionare lastre sensibili attraverso strati di metallo, ma anche di far perdere la carica elettrica ai corpi e di ionizzare, ossia rendere conduttore, il gas che attraversano. Queste proprietà furono utilizzate tosto per la ricerca di altri corpi che emettono raggi uranici, come li chiamò il BECQUEREL.

Cosí nel 1898 G. C. SCHMIDT in Germania e Maria SKLODOWSKA in Francia trovarono indipendentemente l'uno dall'altra che il torio e i suoi composti si comportano come l'uranio. Poco piú tardi la SKLODOWSKA, in collaborazione col marito Pierre CURIE, già celebre per studi sul magnetismo, intraprese il lungo e faticoso lavoro dell'estrazione dalla pechblenda di Joachimsthal di un nuovo elemento, che godeva le proprietà dell'uranio e del torio e che in onore della patria della SKLODOWSKA venne chiamato polonio. Un anno dopo col BÉMONT i CURIE scoprirono il radio e l'anno successivo il DEBIERNE mise in evidenza l'attinio.

Seguí cioè un periodo di ricerca febbrile dei corpi che emettono spontaneamente radiazioni e che per questo dai CURIE furono chiamati radioattivi. Si attrezzarono appositi laboratori e ci si buttò al lavoro con entusiasmo pari all'imprudenza. Cosicché, mentre si portavano alla luce circa trenta sostanze radioattive, molti

fisici sperimentarono sulla loro stessa persona gli effetti deleteri delle misteriose radiazioni.

Solo assai tardi il generoso sacrificio dei primi ricercatori fu compensato, quando la conoscenza delle proprietà dei raggi provenienti dai corpi radioattivi permise di dosarne gli effetti sull'organismo e volgerli a beneficio dell'umanità sofferente.

La natura delle radiazioni emesse dai corpi radioattivi.

Quale è dunque la natura delle radiazioni emesse dai corpi radioattivi? La risposta a questa domanda è venuta piú che dalle loro proprietà attiniche o di ionizzare, dai resultati che si ottengono assoggettandole durante il loro percorso all'azione di campi elettrici e magnetici o studiandone l'assorbimento nella materia.

Cosí si è potuto sapere che alcune di esse sono di natura elettromagnetica e altre di natura corpuscolare; in quest'ultimo caso, si è riconosciuto il segno della loro carica elettrica, il rapporto fra la carica e la massa, e la velocità di propagazione. È merito particolare di Ernst RUTHERFORD se in pochi anni gran parte di quanto si desiderava sapere a questo proposito è stato messo in luce.

Una vecchia esperienza molto nota dice che tre tipi distinti di radiazioni si possono ottenere dai corpi radioattivi: i raggi *alfa* (α) e *beta* (β) corpuscolari, e i raggi *gamma* (γ), della stessa natura dei raggi X. Una miscela di sostanze ra-

dioattive sia contenuta in un blocchetto di piombo cavo; dalla cavità esce un fascio che si propaga in linea retta. Si stabilisca allora un campo magnetico molto intenso, parallelo al fondo del blocchetto (nella figura 55 diretto dal disopra al disotto al piano del foglio). Se i raggi espulsi nel fenomeno radioattivo fossero visibili apparirebbero separati a questo modo: i raggi α sarebbero deviati poco e verso sinistra; i raggi β verrebbero piegati verso destra e descriverebbero numerose traiettorie circolari; i raggi γ proseguirebbero invece in linea retta. Se si ricoprisse il recipiente delle sostanze radioattive con un coperchietto di alluminio di un decimo di mm di spessore, i raggi α, che prima percorrevano in media 5 cm d'aria, sarebbero assorbiti totalmente; i raggi β, che in generale arrivano piú lontano dei primi, solo in parte; mentre i raggi γ rimarrebbero del tutto indisturbati.

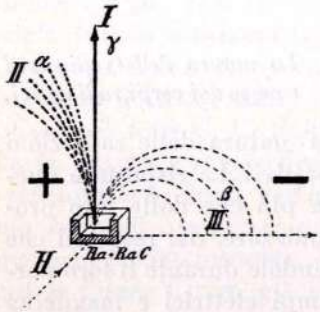


Fig. 55. — Cammino schematico dei raggi provenienti da *Ra+RaC* nel campo magnetico *H* (polo nord al di sopra del piano del foglio).

Dei raggi α e β si può quindi dire subito che sono corpuscoli a carica di segno opposto, e massa diversa; piú piccola certo quella delle

particelle β, che superano piú facilmente la materia. Se si completa l'analisi magnetica con quella elettrica si trova che l'emissione α è costituita di corpuscoli con due cariche elementari positive e massa materiale di quattro unità. Questi corpuscoli sono dunque atomi di elio privati dei due elettroni superficiali.

I raggi β invece per il valore e il segno della loro carica e l'ammontare della loro massa non differiscono dagli elettroni, che già conosciamo.

Mentre le particelle α posseggono velocità caratteristica dell'elemento che le proietta; i raggi β vengono espulsi con velocità diverse anche da uno stesso corpo radioattivo. La velocità che essi raggiungono talvolta non è molto lontana da quella della luce, ma, per l'esiguità della loro massa, l'energia di cui dispongono è sempre inferiore a quella delle particelle α, che pure sono in generale assai meno veloci.

Con la camera del WILSON si vede come queste diano luogo a traccie dense di nebbia, mentre i corpuscoli β presentano traiettorie lievi e frammentate (Cap. I e Tav. VI). Infatti le particelle α rappresentano una delle piú forti concentrazioni di energia. Esse sono proiettili di appena un decibilionesimo di cm di raggio, del peso di qualche bilionesimo di bilionesimo di grammo, ma animati da una velocità media dell'ordine di 20 000 km al secondo. Quali disastri e quante mutilazioni di molecole ed atomi possono quindi produrre sul loro cammino! Nell'attraversare uno strato d'aria a pressione

normale di circa 5 cm essi provocano la ionizzazione di ben 150 000 molecole.

Nelle stesse condizioni i raggi β producono con velocità maggiori la ionizzazione di solo qualche centinaio di molecole.

I raggi γ, che non subiscono influenza da parte dei campi elettrico e magnetico, sono invece radiazioni della stessa natura delle radio-onde e delle onde luminose e X. Ma mentre nelle prime la lunghezza d'onda si misura in km, o in m o al piú in cm; mentre presso la luce lo è in decimillesimi di mm, presso la radiazione γ essa viene misurata in millesimi di milionesimi di mm, cioè con valori anche piú piccoli di quelli dei raggi X. I raggi γ hanno in conseguenza un potere di penetrazione maggiore di quello dei raggi X e sono capaci spesso di superare enormi spessori di acciaio o di piombo. Nell'aria in condizioni normali alcuni di essi producono soltanto una coppia di ioni per cm di percorso. Perdono quindi poca energia e possono propagarsi con modesto assorbimento per decine di metri.

La sede del processo radioattivo.

Già Enrico Becquerel si era accorto che la nuova manifestazione della materia si presentava invariata qualunque fosse il composto chimico contenente l'uranio. Essa non doveva quindi aver sede nella molecola, bensí nell'atomo. La stessa cosa si verificava per tutti gli

altri elementi radioattivi. La radioattività è quindi una proprietà atomica e non della molecola.

Ma che avviene allora di un atomo che ha espulso una particella α o β? Esaminiamo la cosa per via sperimentale. Una piccola quantità di un composto solido di radio sia rinchiusa in un tubetto di vetro in comunicazione con un manometro sensibile. Si faccia il vuoto nel tubetto. Dopo alcuni giorni si nota che il manometro segna una pressione piú alta di prima e nell'oscurità si vede che il tubetto nel suo interno è diventato luminescente. In esso si è certo sviluppato un gas. Se raccogliamo questo gas e lo introduciamo in un tubo di scarica, analizzando la luce emessa allo spettroscopio, vediamo comparire uno spettro diverso da quello di tutti gli altri elementi conosciuti. La distribuzione delle righe spettrali ha solo qualche analogia con quella che si verifica presso i gas nobili. Tuttavia dopo un certo tempo questo nuovo spettro non c'è piú. Si osserva solo quello dell'elio prodottosi evidentemente coll'accumularsi di particelle α neutralizzate.

Cosa vuol dire tutto questo? Il gas che abbiamo trovato nel tubetto proviene certo da atomi di radio che hanno eliminato una particella α. Il numero degli atomi di radio scomparsi corrisponde infatti a quello degli atomi del gas che si è formato; e se si misurasse il peso atomico di quest'ultimo si vedrebbe che esso è circa 222, cioè di 4 unità inferiore a quello del radio, che

è 226. Aggiungiamo che anche al cimento chimico questo gas rivela proprietà simili a quelle dei gas nobili; esso non si combina cioè con nessun altro elemento per dar luogo a composti; il radio invece presenta analogie col bario. Ma anche la nuova sostanza originata dal radio, e perciò detta emanazione del radio, ha proprietà radioattive e rapidamente la sua essenza si modifica e il gas sparisce.

Le manifestazioni radioattive sono dunque disintegrazioni, per cui una specie atomica si trasforma in un'altra. Il cambiamento radicale delle proprietà fisico-chimiche dell'elemento prodottosi avverte appunto che tale disintegrazione ha luogo nel nucleo dell'atomo; e questo anche quando si tratta di emissione elettronica (trasformazioni tipo β).

La cosa che nei primi tempi sembrava meravigliosa, ora appare una naturale e semplice conseguenza di fatti noti. Le particelle α e β che provengono dal nucleo ne modificano la carica e quindi il numero atomico, che è l'unica e vera caratteristica di ogni elemento (Cap. V).

Cosí quando un atomo perde una particella α, che porta con sé due cariche elementari positive, il numero atomico del nucleo rimanente è diminuito di due unità. Allora nella tavola periodica degli elementi (Tav. VIII) esso andrà a occupare la casella che precede di due posti quella che appartiene all'elemento generatore. Se invece si ha emissione di una particella β,

nel nucleo atomico si renderà libera una carica positiva, prima neutralizzata dall'elettrone emesso, e il numero atomico cresce di un'unità. L'elemento che nasce occupa nella tavola periodica il posto che succede immediatamente a quello dell'elemento originale.

Quesa è la cosí detta legge degli spostamenti radioattivi.

Lo studio sistematico delle trasformazioni successive ha permesso di ricostruire (Fig. 56) la catena dei processi radioattivi (famiglie). Alla emanazione del radio per es. seguono diverse sostanze, che sono state chiamate radio *A, B, C*, ecc. Si passa dall'una all'altra per emissione di una particella α o β, accompagnate eventualmente da radiazione γ. Ma il radio a sua volta è derivato dopo una serie di trasformazioni dall'uranio. Questo è probabilmente il capostipite anche delle famiglie dell'attinio e del torio, per quanto per queste ultime non si sia ancora potuto stabilire con precisione i costituenti iniziali ed il punto di innesto all'albero principale.

Interessante è il fatto, che si osserva di frequente presso le famiglie radioattive, dell'emissione di una particella α seguita da due trasformazioni β successive. Per la prima il numero atomico diminuisce di due unità, per le altre invece cresce di due unità. Quindi l'elemento a cui si arriva ha lo stesso numero atomico di quello di partenza. Solo il peso atomico è diverso. Esso cioè è un suo isotopo.

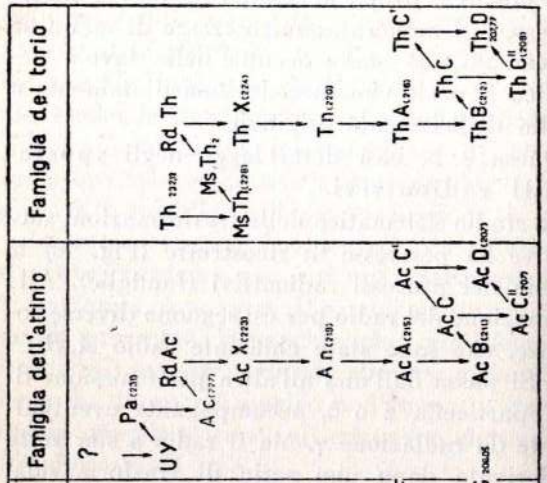


Fig. 56. — Diagramma delle tre famiglie radioattive. Le frecce verticali indicano trasformazioni con emissione di particelle α, quelle inclinate trasformazioni con emissione di particelle β. Gli elementi sulla stessa orizzontale sono isotopi fra loro.

Tutte le famiglie radioattive si estinguono in un elemento stabile, che è un isotopo del piombo. Tali sono radio *G*, attinio *D* e torio *D*, di cui il primo pesa 206 e l'ultimo 208, mentre il piombo ordinario ha peso atomico prossimo a 207 unità, come l'attinio *D*.

Il "caso" nei processi radioattivi.

Abbiamo visto che lo spettro caratteristico dell'emanazione del radio, isolata dalla sostanza da cui ha avuto origine, scompare dopo alcuni giorni dal tubo di scarica. L'emanazione del radio dura cioè poco tempo. La stessa cosa non avviene pel radio, le cui diminuzioni di peso sono sensibili solo dopo un lungo periodo di anni.

Per questo è necessario parlare di vita degli elementi radioattivi e precisamente di vita media. Essa è una costante di grande importanza per ogni elemento, ma varia da elemento a elemento entro vasti limiti! Ammonta a 2280 anni pel radio e a 4,4 minuti pel radio *A*, mentre è di 5,5 giorni per l'emanazione.

Ma quando diciamo che la vita media del radio è di 2280 anni non bisogna credere che ogni atomo di radio muoia, cioè si trasformi, dopo aver raggiunto la non disprezzabile età di 2280 anni. Presso un grandissimo numero di atomi piuttosto tutto avviene come se ognuno vivesse un tal numero di anni.

Quando si afferma che la vita media di ogni

individuo è circa di 55 anni, ciò non significa che ogni uomo debba morire a questa età; ma che 55 sono gli anni che spetterebbero a ciascun individuo, se la somma degli anni disponibili per il genere umano fosse ugualmente ripartita fra tutti gli uomini.

Allo stesso modo per calcolare la vita media di un dato elemento radioattivo noi dividiamo la somma della durata vitale di tutti gli atomi presenti pel numero di tali atomi. La conoscenza del numero di atomi che si trasforma in un dato tempo permette di fare questo calcolo.

In sostanza cosí operando noi supponiamo che in tempi uguali il numero delle disintegrazioni atomiche sia sempre lo stesso. In effetto non è cosí. In tempi eguali e successivi il numero degli atomi che si trasforma subisce fluttuazioni anche molto notevoli, pur mantenendosi nella maggioranza dei casi intorno a un valore determinato che è il piú probabile. L'analisi di queste fluttuazioni dimostra che nessuna causa specifica si può invocare per giustificare ogni atto di disintegrazione atomica.

Il "caso" solo è il démone che regge il destino degli atomi radioattivi e le sue leggi, che sono leggi di grandi numeri, sono quelle che regolano e numerano le disintegrazioni. Un atomo isolato può trasformarsi appena formato o può anche vivere eternamente. E se sappiamo come ogni singolo individuo nasce e muore, il perché della sua nascita e della sua morte ci sfugge.

Alla vita media di un atomo radioattivo è

connesso un fatto interessante. Se in un sistema di assi cartesiani ortogonali si portano in ascisse le energie delle particelle α, e in ordinate i logaritmi dell'inverso della vita media degli

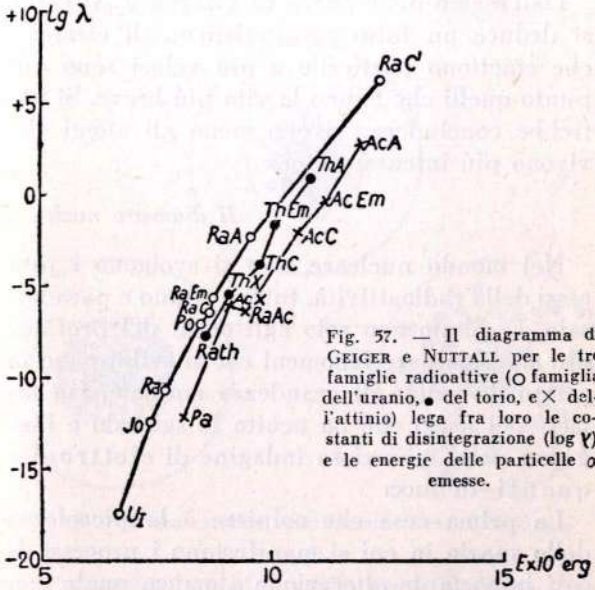


Fig. 57. — Il diagramma di GEIGER e NUTTALL per le tre famiglie radioattive (○ famiglia dell'uranio, ● del torio, e × dell'attinio) lega fra loro le costanti di disintegrazione (log γ) e le energie delle particelle α emesse.

elementi da cui provengono si ottiene una linea caratteristica per ogni famiglia radioattiva (Fig. 57). Questa legge che lega un dato probabilistico, quale è la vita media, a un dato energetico, è stata messa in evidenza nel 1911 da GEIGER e NUTTALL.

Con essa misurando il percorso delle parti-

celle emesse, ossia la loro energia, si sono potute determinare le vite medie degli elementi piú labili, come quella del radio C' ($\frac{1}{50\,000\,000}$ di secondo).

Dall'esame delle curve di GEIGER e NUTTALL si deduce un fatto caratteristico: gli elementi che emettono particelle α piú veloci sono appunto quelli che hanno la vita piú breve. Si potrebbe concludere: vivono meno gli atomi che vivono piú intensamente.

Il diametro nucleare.

Nel mondo nucleare, ove si svolgono i processi della radioattività, tutto è strano e paradossale. E questo non solo agli occhi del profano, uso ad esaminare fenomeni che si sviluppano in campi di ordine di grandezza normale, ma altresí pel fisico che ha acuito lo sguardo e l'ingegno nella minuziosa indagine di elettroni e quanti di luce.

La prima cosa che colpisce è la piccolezza dello spazio in cui si manifestano i processi di cosí importante alterazione atomica, quale non si riscontra presso i fenomeni fisico-chimici ordinari, e cioè la modificazione della specie chimica dell'atomo stesso.

Molti procedimenti permettono di valutare il raggio dell'atomo, esso ammonta a un centomilionesimo di cm. Nella sfera che ha questo raggio, secondo i modelli di cui già si è parlato (Cap. V), gravitano intorno a un centro mate-

riale gli elettroni. Anche questi hanno dimensioni note: il raggio è dell'ordine di un decimilionesimo di milionesimo di cm. L'atomo quindi non è impenetrabile, ma nel suo interno ha spazi vuoti, non occupati né da elettroni, né da materia.

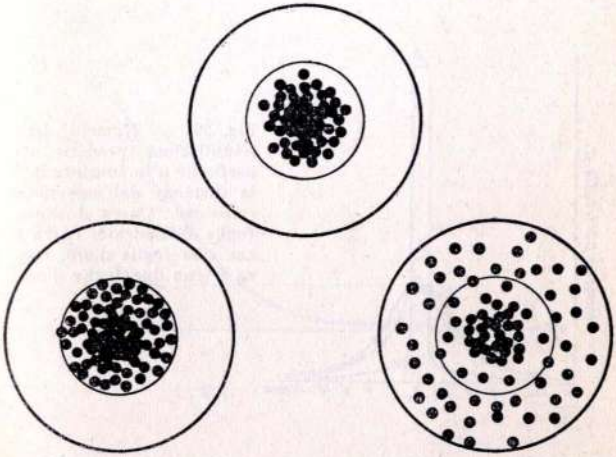


Fig. 58. — Schema rappresentante particelle che si diffondono.

È appunto questa costituzione atomica che permette a particelle α e β di traversare foglie sottili di metallo o di mica. Ed è la fortunata possibilità di lanciare nell'atomo degli esploratori obbedienti e fedeli come sono le particelle α e β, che ci ha condotto a trovare i limiti della regione occupata dal nucleo.

Da un piccolo foro, praticato nella parete di un recipiente di piombo che contiene un corpo

radioattivo, esca un fascio di particelle α. Esse possano venire raccolte sopra uno schermo fluorescente di solfuro di zinco.

Se sul cammino dei raggi α non è interposto nessuno strato materiale, il loro fascio si manterrà serrato e sullo schermo si produrranno

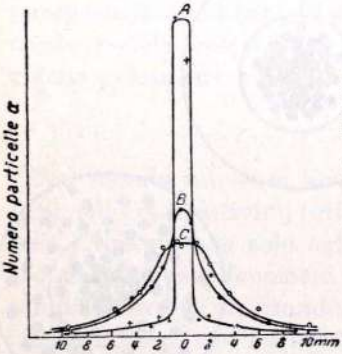


Fig. 59. — Numero delle scintillazioni prodotte da particelle α in funzione della distanza dall'asse della emissione. Curva *A* senza foglia diffondente, curva *B* con una foglia d'oro, curva *C* con due foglie d'oro.

scintillazioni in una zona molto ristretta. Se lungo il percorso delle particelle si interpone invece una laminetta d'oro sottilissima, le scintillazioni si manifestano piú rade, ma distribuite su una regione molto piú ampia dello schermo.

Quando si aumenta lo spessore della lamina metallica, le particelle producono scintillazioni su quasi tutta la superficie dello schermo. Le particelle α vengono cioè sparpagliate senza esser state notevolmente assorbite (Figg. 58, 59).

Gli elettroni dell'atmosfera esterna al nucleo non possono causare un fenomeno come questo, perché la loro massa non è sufficiente, anche dopo un urto diretto, a produrre deviazione osservabile di una particella α, che ha massa comparativamente enorme ed è animata da velocità considerevole.

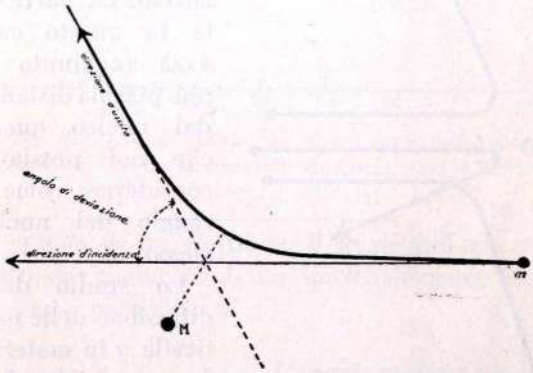


Fig. 60. — Traiettoria di una particella positiva m nelle vicinanze di un nucleo, M. La particella descrive un arco di iperbole con M sito nel fuoco esterno.

La causa dello sparpagliamento dei raggi α va quindi cercata nel nucleo. Esso presso gli atomi pesanti e ad elevato numero atomico, quale è l'oro, esercita una fortissima azione intorno a sé. Una particella α che penetra nel suo campo di forze, per essa repulsive, viene certo deviata. E la deviazione è tanto piú sensibile

quanto piú la particella nel suo percorso si è avvicinata al nucleo (Figg. 60, 61).

Capiterà talvolta che una particella si avvii nella direzione del centro del nucleo; allora essa verrà respinta indietro, lungo il cammino primitivo. La particella in questo caso avrà raggiunto la piú piccola distanza dal nucleo, quella che noi possiamo considerare come il raggio del nucleo stesso.

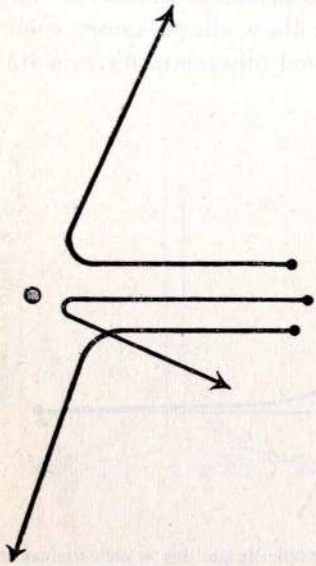


Fig. 61. — Traiettorie di particelle positive nelle vicinanze di un nucleo, diverse a seconda della distanza a cui sono pervenute dal nucleo.

Lo studio della diffusione delle particelle α in materiale pesante ha fornito dati relativi alla carica nucleare, e altresí quella misura delle dimensioni dello spazio occupato dalla parte ponderale dell'atomo che era necessaria per una completa figurazione di esso (Fig. 62).

Sappiamo cosí che il diametro di un nucleo pesante è dell'ordine del milionesimo di milionesimo di cm. Esso è solo dieci volte piú grande

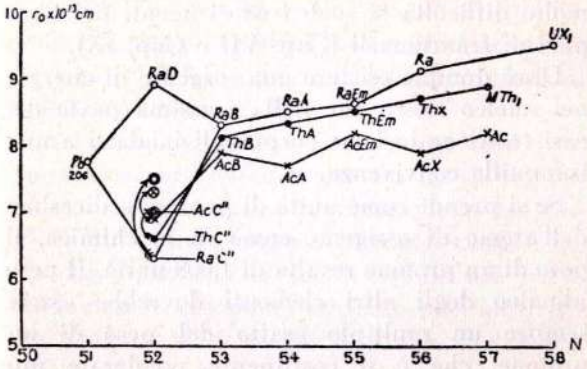


Fig. 62. — Raggi nucleari dei diversi corpi radioattivi. Sulle ascisse, i numeri atomici; sulle ordinate, i raggi in 10^{-13} cm.

di quello di un elettrone, il quale differisce di poco dal diametro di un nucleo leggero, come la stessa particella α.

L'energia nucleare e la barriera di potenziale.

La seconda cosa che può destar meraviglia è quindi come in cosí piccolo spazio possano coesistere particelle certo in prevalenza positive. La repulsione elettrostatica fra le cariche omonime dovrebbe far sempre esplodere istantaneamente un simile aggregato. La radioattività dovrebbe essere una proprietà generale della materia e non rimaner limitata a pochi elementi. In realtà i nuclei della massima parte degli atomi sono tutti stabilissimi, tanto che solo con

molte difficoltà si sono trovati agenti fisici capaci di frantumarli (Cap. VII e Cap. IX).

Deve dunque esistere una sorgente di energia nel nucleo stesso che nella massima parte dei casi trattiene insieme corpuscoli inadatti a una tranquilla convivenza.

Se si prende come unità di peso un sedicesimo dell'atomo di ossigeno, come fa la chimica, il peso di un protone resulta di 1,008 unità. Il peso atomico degli altri elementi dovrebbe essere sempre un multiplo esatto del peso di un protone, che è il costituente ponderale piú piccolo di ogni nucleo. In realtà non è cosí. Il totale non è uguale alla somma degli addendi; il peso atomico degli elementi presenta sempre una differenza in meno rispetto al conveniente multiplo del peso del protone. I varî protoni unendosi fra loro perdono dunque una parte del loro peso, contrariamente alla legge della conservazione delle masse, che regge i processi della chimica.

Dove se ne è andata la massa perduta? Risponde la relatività con la nota relazione di corrispondenza fra materia ed energia (Cap. III). La perdita di massa di un sistema, se moltiplicata per il quadrato della velocità della luce, rappresenta l'energia guadagnata dal sistema stesso. In unità pratiche un grammo di materia distrutta fornisce 25 milioni di kilowatt-ora di energia.

Il difetto di peso atomico di un dato elemento rispetto alla somma dei componenti elementari,

si è tradotto precisamente in energia, quella enorme quantità di energia che era necessaria per legare fra loro i protoni e gli altri individui che stanno nel suo nucleo.

La frazione di massa perduta per ogni protone è una caratteristica importante di ciascun elemento, perché essa è la misura della sua stabilità. Piú grande è questa frazione meno è facile che l'elemento si dissolva nelle sue parti. Gli Inglesi la chiamano appunto *packing fraction*, frazione di impacchettamento, di legame.

Un giovane fisico russo, il GAMOW, ha pensato che questa energia nucleare desse luogo a una specie di tensione superficiale, paragonabile alla tensione superficiale di una goccia liquida. Questa trattiene insieme in una sferetta le molecole liquide che altrimenti pel loro peso si disporrebbero su un piano; la tensione superficiale del nucleo equilibra le forze antagoniste fra le particelle α e i protoni.

Vediamo ora come sia fatta la pellicola che inviluppa il nucleo. Questo equivale a descrivere come sono distribuite le forze intorno ad esso. La legge di questa distribuzione si è ricavata dallo stesso studio della diffusione delle particelle α nella materia, che già ha fornito il diametro nucleare. È chiaro che il numero di particelle lanciate in una data direzione è in diretta dipendenza dal valore delle forze cui soggiacciono al momento della loro deviazione

massima. E queste, oltre che della carica nucleare, sono funzione della distanza dal nucleo.

Ora se si ammette che queste forze siano di tipo coulombiano, cioè variino come l'inverso del quadrato della distanza dal centro nucleare, il numero delle particelle α diffuse sotto un

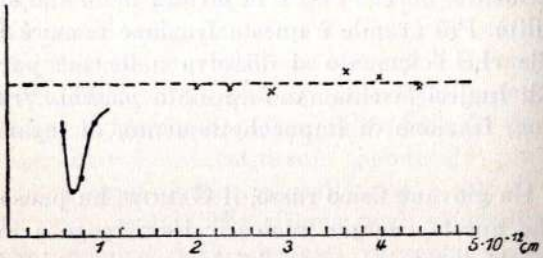


Fig. 63. — Diffusione di particelle α in lastrine di *Mg* (punti e curva) e *Ag* (crocette e punteggiata) sotto l'angolo di 135°. Sull'asse delle ordinate sono i rapporti fra il numero delle particelle diffuse secondo l'esperienza e quello calcolato in base alla legge di Coulomb. Sull'asse delle ascisse sono le distanze minime dal nucleo a cui le particelle sono arrivate. Si vede che le particelle diffuse da *Ag* che si avvicinano meno al nucleo diffondono come vuole la teoria. Quelle che hanno traversato *Mg* a distanze inferiori a 10^{-12} cm presentano diffusione anormale.

certo azimut da diffusori a grande peso atomico coincide con quello calcolato. Invece quello che si ottiene con diffusori leggeri rimane lontano assai dai resultati teorici (Fig. 63). In questo caso la diffusione è anomala rispetto a quella che è considerata normale, perché prodotta da forze di forma classica e nota.

Ma quale è la differenza di comportamento di una particella α in un diffusore pesante e in

uno leggero? Nel secondo caso la particella che incontra forze meno grandi, perché prodotte da centri a minor numero di cariche elementari positive, si avvicina al centro del nucleo piú che non faccia di fronte ad atomi di numero atomico elevato. Con l'anormalità della sua diffusione essa rivela quindi che, a distanze inferiori a un certo limite, la forza a cui soggiace

Fig. 64. — La distribuzione delle energie potenziali nelle vicinanze di un nucleo. Sull'asse orizzontale sono le distanze dal centro del nucleo.

non è piú quella semplice di COULOMB. Essa rivela col valore minore della sua deviazione che a questa forza repulsiva se ne aggiunge una attrattiva che cresce molto rapidamente col diminuire della distanza.

Ma parliamo di energie invece che di forze, cioè del lavoro che si deve compiere per allontanare una particella positiva da un certo punto delle adiacenze nucleari. Diremo allora che l'energia potenziale cresce man mano che ci si avvicina al nucleo, ma a una distanza di

circa un bilionesimo di cm, quando la forza attrattiva comincia a farsi sentire prima debolmente poi sempre piú forte, l'energia potenziale rallenta il suo aumento, raggiunge un massimo e poi precipita molto rapidamente (Fig. 64) fino a invertire il suo segno.

Cosí una particella positiva che sta nell'interno della regione nucleare ha intorno a sé una muraglia altissima. Essa si trova come in fondo al cratere di un vulcano. Di qui essa non dovrebbe uscire senza l'intervento di qualche fatto paragonabile ai processi endogeni che imprimono alla lava del vulcano energia sufficiente a superare il dislivello che la separa dal bordo del cratere.

Il meccanismo delle trasmutazioni spontanee degli elementi.

Siamo nel regno del paradossale e si verificano quindi le cose piú inaspettate. L'esperienza insegna che nelle trasformazioni radioattive le particelle abbandonano il nucleo per lo piú con energia inferiore a quella della barriera da superare. Di fronte alla difficoltà presentata dalle trasformazioni tipo α il GAMOW ha potuto correre ai ripari. Il paragone con la lava non può essere conservato fino in fondo, perché la meccanica classica, che guida la lava del vulcano nella sua traiettoria, non vale per le particelle α del nucleo. Queste debbono esser trattate dalla meccanica ondulatoria, date le loro piccole dimensioni e l'esiguità dello spazio in

cui si muovono. La meccanica ondulatoria le considera come onde e nella barriera di potenziale, che talvolta superano, vede un mezzo a indice di rifrazione variabile, un mezzo per esse almeno in parte trasparente. Coll'uso delle equazioni di propagazione della meccanica ondulatoria (Cap. IV) il GAMOW quindi calcola la probabilità che una particella α traversi l'ostacolo che è opposto dal campo di forze che cinge il nucleo. Il procedimento è perfettamente consono alla realtà, perché abbiamo visto che le disintegrazioni radioattive sono rette dalle leggi del caso.

Giunge cosí il GAMOW a giustificare la stabilità della massima parte dei nuclei atomici, presso i quali la probabilità di traversare lo strato superficiale del nucleo è, se non nulla, trascurabile, giunge anche a render conto dei processi radioattivi che si manifestano quando sono realizzate le condizioni in cui si trovano gli atomi meno leggeri; in questo caso le probabilità della transizione considerata raggiunge valori da prendere in considerazione. Le vite medie che ottiene il GAMOW, e con lui gli altri fisici che si sono accupati dell'argomento, sono per ogni elemento del giusto ordine di grandezza. Ma il GAMOW ha fatto anche di piú. Dalla sua teoria egli è riuscito a dedurre la relazione che lega la vita media del corpo radioattivo alla energia delle particelle emesse. Egli ha giustificato cioè la legge scoperta empiricamente da GEIGER e NUTTALL.

I raggi γ.

Se, trasformando il problema della permanenza e della fuoruscita delle particelle nucleari in un problema per cosí dire di ottica, si è pervenuti a una certa comprensione del meccanismo delle disintegrazioni atomiche, non per questo si può ritenere di aver progredito molto nella conoscenza della struttura nucleare.

Particelle α, protoni convivono in piccolo spazio perché vi sono costretti da una muraglia periferica, ma come in esso sono distribuiti e quali sono le loro relazioni reciproche?

Noi potremo dire di conoscere il nucleo quando lo potremo descrivere cosí come descriviamo l'atomo di sodio o quello di uranio; quando cioè potremo definire i livelli energetici occupati dai componenti nucleari, come definiamo quelli che nell'atmosfera atomica sono occupati dagli elettroni.

Supponiamo infatti per ragione di analogia che qualche cosa di simile a quello che avviene all'esterno abbia luogo all'interno del nucleo.

Ma chi ci può garantire che abbiamo ragione? Per studiare la struttura nucleare oltre le energie delle particelle che escono dal nucleo, noi dobbiamo procurarci quelle delle radiazioni elettromagnetiche che emette il nucleo stesso, i raggi γ.

Una prima questione da mettere in luce relativamente a questa radiazione era se essa pre-

ceda o segua la disintegrazione atomica; questione importantissima a suo tempo per la concezione di tutto il meccanismo nucleare. E a suo tempo essa è stata risolta dalla signorina Lise MEITNER la quale ha stabilito senza ambiguità che la radiazione γ è la conseguenza e non la causa del processo radioattivo.

Bisogna ora determinare con accuratezza lo spettro della radiazione γ se si vuole che esso, come hanno fatto gli spettri ottici e dei raggi X per l'atomo, dica qualche cosa della sistemazione delle particelle dai cui spostamenti nel nucleo proviene.

E qui si incontrano grandi difficoltà tecniche. I raggi γ hanno lunghezza d'onda tanto corta che anche i reticoli cristallini che servono bene pei raggi X non riescono vantaggiosi che in casi particolari. I raggi γ quando traversano la materia dànno luogo a effetto fotoelettrico, ma in prevalenza ad effetto Compton (Cap. II). L'uno e l'altro dei due fenomeni sono stati messi a contributo per la misura della lunghezza d'onda dei raggi γ. Disposizioni particolari nel caso dell'effetto fotoelettrico, formule teoriche ben elaborate, che legano il coefficiente di diffusione alla frequenza della radiazione diffusa (formula di KLEIN e NISHINA) nel secondo caso, vengono utilizzate. Siamo tuttavia ancora lontani dal possedere una perfetta conoscenza dello spettro γ.

In qualche caso coi dati di cui si dispone si è riusciti a mettere in relazione l'energia libe-

rata da particelle α che passano da un livello a un altro con l'energia portata fuori del nucleo dal quanto γ emesso.

Ma una descrizione completa e univoca dei livelli interni del nucleo ancora non si possiede nemmeno per casi particolari.

Il problema dei raggi β.

E non è questa l'unica lacuna che presenta la nuova fisica: altri fatti esistono nella radioattività che si sono ribellati per molto tempo a qualunque interpretazione.

Il piú importante è quello della emissione delle particelle β. I raggi β che escono dai nuclei di una stessa specie chimica, non hanno tutti velocità uguale, anzi il loro spettro magnetico (o elettrico) è continuo e abbraccia una vasta regione di velocità. Per esempio dal Ra*C* vengono emessi elettroni con velocità variabile press'a poco da zero al valore della velocità della luce. Solo certe velocità sembrano piú probabili e intorno ad esse si raggruppa il massimo numero di elettroni (Fig. 65).

Nonostante questo la vita media dell'elemento emittente è ben determinata e gli atomi, a cui si arriva dopo la trasformazione β, sono identici fra loro.

Essi hanno un contenuto energetico nucleare diverso e variabile con continuità dall'uno all'altro, perché provengono da individui che oltre

a un elettrone hanno ceduto energie differenti; eppure essi si comportano tutti allo stesso modo e non si conosce nessun fatto, nessuna proprietà che valga a distinguerli.

Le trasformazioni β hanno rivelato che esi-

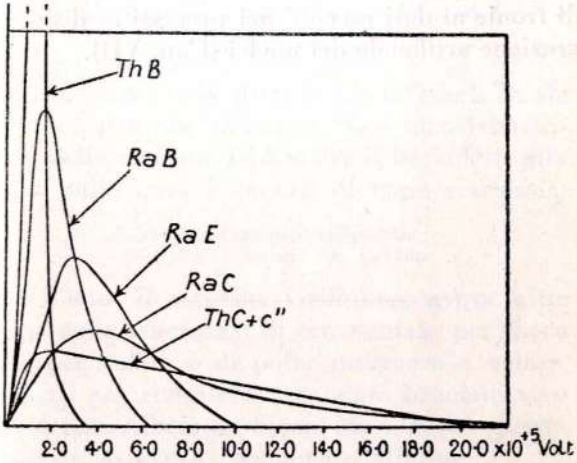


Fig. 65. — Distribuzione delle intensità dei raggi β di diversa energia per diversi corpi radioattivi.

stono atomi della stessa specie chimica a diversa energia interna e non si vede a cosa corrisponda questa differenza. Anche la meccanica quantistica nuova ha incontrato difficoltà a trovare il bandolo della intricata matassa.

Sembra che il principio della conservazione dell'energia perda il suo significato quando viene applicato agli elettroni nucleari; oppure

che questi siano una cosa diversa nel nucleo da quella che conosciamo noi; che essi riassumano le solite sembianze soltanto fuori del brevissimo spazio nucleare.

Le difficoltà che incontrava l'interpretazione di questo fenomeno si sono tuttavia attenuate di fronte ai dati raccolti nei processi di disintegrazione artificiale dei nuclei (Cap. VII).

CAPITOLO VII

LE TRASMUTAZIONI ARTIFICIALI DELLA MATERIA

Introduzione. La disintegrazione con particelle α. Il neutrone. Le disintegrazioni con protoni e con diploni veloci. La disintegrazione con neutroni. La disintegrazione per raggi γ e raggi X di grande eneregia. La struttura nucleare e i raggi β.

NELL'ULTIMA delle dieci bolgie infernali Dante incontra due alchimisti. Essi sono febbricitanti della malsana febbre che li ha indotti alla colpa sulla terra e coperti di impura scabbia.

.... io son l'ombra di Capocchio
che falsai li metalli con alchimia

dice l'uno. Il secondo, Griffolino, aveva altre colpe sulla coscienza. Si era vantato per gioco di saper volare e di poter insegnare a volare. Non gli era riuscito ed era stato bruciato vivo dal deluso Albero da Siena. Ma non per questa vanteria lo aveva condannato Minosse:

me, per l'alchimia che nel mondo usai,
dannò Minos, a cui fallar non lece.

Dante non era dunque troppo tenero per gli alchimisti e li ha trattati con alquanta severità.

Due cose prometteva l'alchimista di compiere nei suoi crogioli, con le sue storte: fabbricare l' "elisir di lunga vita" e trasmutare i metalli in oro. Egli cioè lusingava il desiderio degli uomini di conseguire la giovinezza eterna insieme con la ricchezza, che rende piacevole la vita.

Non è forse chiaro se Dante disapprovasse

l'operazione scientifica in sé, oppure se era conscio dell'illusione delle promesse alchimistiche. Non è chiaro cioè se per Dante l'alchimista era un falsario perché falsava la materia, o perché dava da bere al pubblico di farlo senza saperlo fare.

Oggi è avvenuta una divisione di lavoro e dell' "elisir di lunga vita" si occupano i medici. Quello che avverrà a loro, quando scenderanno agli inferi, non ci interessa. Ma ci dispiace invece di prevedere che, nella prima ipotesi circa l'opinione dantesca, il fisico moderno, oggi intento nel suo laboratorio a trasformare veramente l'uno nell'altro gli elementi, dovrà andare a occupare un posto fra i due ribaldi, Griffolino e Capocchio.

Il fisico moderno, che disintegra nel modo piú disinteressato gli atomi anche meno nobili — invero di produrre l'oro fin qui non si è occupato — il fisico moderno non può accettare l'alchimista come suo precursore. L'alchimista non sapeva compiere che operazioni di carattere chimico: formazione o dissociazione di composti, passaggi di un composto in un altro. L'intima compagine della materia sfuggiva ai suoi poteri; a meno che non esistesse veramente la misteriosa "pietra filosofale", che egli invocava, reagente o magia di cui nei secoli si è perduta la formula e il significato.

Solo infatti una formula magica avrebbe potuto nell'evo medio sostituire con qualche efficacia le energie di cui si deve disporre per di-

sintegrare la materia, cioè per spezzare in parti il componente pesante dell'atomo, il nucleo.

Per dissociare una molecola, cioè separarne gli atomi componenti, nelle nostre convenzioni energetiche [1], diciamo che occorrono al massimo dieci volt; in generale basta assai meno. Per ionizzare un atomo, cioè staccarne uno o piú elettroni, si può richiedere anche due, trecentomila volt. Ma per rompere un nucleo, in cui le parti materiali ed elettriche, sono fortemente legate fra loro, occorrono per lo piú milioni di volt.

Dove trovare gli enormi valori delle energie che disgregando il nucleo lo inducano a rivelarci la sua struttura, lo inducano cioè ad arricchirci di cognizioni che hanno pregio superiore a quello dell'oro? Non certo nella provetta o nel crogiolo, dove bisognerebbe sviluppare temperature dell'ordine di diecimila milioni di gradi per ottenere questo resultato.

Il modo piú semplice di rompere un oggetto ce lo insegna il bambino o lo spaccapietre. Con una martellata ben aggiustata la testa di porcellana di un fantoccio o un sasso vanno in frantumi.

Il metodo delle martellate non è nuovo

[1] *Energia di tanti volt (o meglio volt per elettrone, simbolo eV) significa l'energia equivalente a quella che acquisterebbe un elettrone introdotto nel campo elettrico stabilito per es. fra due lastre metalliche piane fra le quali esiste quella differenza di potenziale in volt. Essa si deduce dalla relazione già citata al Capitolo III:*

$$1/2\, m\, v^2 = eV/300.$$

nella fisica. Essa lo ha usato nelle sue aggressioni contro l'atomo o la molecola. Il metodo ha avuto successo, è naturale quindi che la fisica lo conservi anche per attaccare il nucleo.

Tutta la difficoltà sta nello scegliere e preparare il martello conveniente allo scopo. Esso deve essere piccino per poter penetrare fra gli elettroni dell'atomo, ma abbastanza pesante per essere confrontabile col nucleo che deve rompere. Un martello di filo d'alluminio per esempio incontrerebbe notevoli difficoltà nell'intaccare anche un sassolino. Gli elettroni anche piú veloci sembrano quindi da scartare. Pel nucleo occorrono proiettili materiali, per quanto di massa moderata, particelle α, per esempio, protoni.

Le particelle materiali che conosciamo portano però spesso carica positiva. L'energia delle particelle bombardanti il nucleo allora non è solo quella richiesta per vincere le forze di collegamento dei costituenti nucleari. Il nucleo non è infatti precisamente una testa di bambola indifesa nelle mani inconscie e crudeli del bimbo. Esso è come una città, munita di un sicuro baluardo di mura. La barriera di potenziale che circonda il nucleo (Cap. VI) si oppone da una parte alla fuoruscita dei suoi costituenti e dall'altra al penetrare in esso di corpuscoli portanti carica positiva. La meccanica ondulatoria, che insegna a forare gli ostacoli che non si sanno saltare, attenua, ma non elimina questa difficoltà.

Per espugnare la fortezza nucleare, lanciando contro di essa corpuscoli positivi, bisogna dotare questi di forte energia. Essa basterà anche a rompere la compagine nucleare.

Sembrò in un primo tempo che la maniera piú spicciativa di risolvere il problema fosse quella di utilizzare gli ioni di elio (raggi α) emessi da certe sostanze radioattive; questi hanno appunto energia cinetica dell'ordine delle barriere dei potenziali nucleari (Cap. VI). Il nucleo venne cosí da prima attaccato con le sue stesse forze: la disintegrazione spontanea di un atomo venne cioè utilizzata per disintegrarne un altro artificialmente.

Ma un atomo ionizzato, cioè carico di elettricità, se introdotto in un campo elettrico può essere accelerato. Solo i limiti delle tensioni che sa raggiungere la tecnica pongono un limite alle velocità che si possono impartire agli ioni in queste condizioni. Ora il problema di accelerare in maniera conveniente atomi di idrogeno ionizzato, cioè protoni, è stato ultimamente risolto con diversi artifici. Cosí anche particelle piú piccole delle α possono esser lanciate con efficacia contro i nuclei.

In questi modi e con processi suggeriti dai resultati di queste prime prove si è realizzata una varietà di mezzi d'attacco, che ha prodotto notevoli frutti. Daremo qui un saggio delle primizie raccolte in questa primavera della fisica nucleare.

La disintegrazione con particelle α.

Ernst RUTHERFORD nel 1919 bombardò pel primo atomi d'azoto con particelle α di un'intensa sorgente di radio *C'*. Il dispositivo usato era estremamente semplice (Fig. 66). Un recipiente riempito di azoto conteneva la sorgente di radio fissata a un sostegno. Sulla parete an-

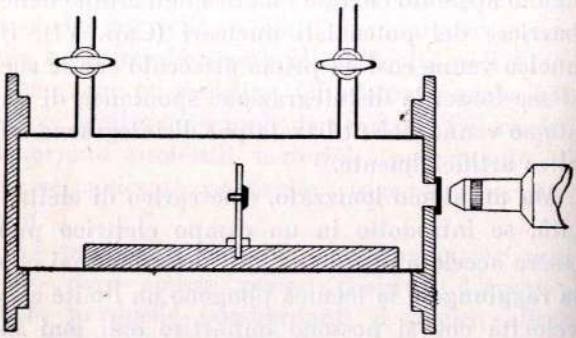


Fig. 66. — Prima disposizione del RUTHERFORD per l'osservazione col metodo delle scintillazioni dei protoni emessi dalle sostanze che si disintegrano sotto l'azione di raggi α.

teriore era praticata un'apertura sulla quale era adagiato uno schermo coperto di solfuro di zinco fluorescente. La distanza fra il preparato radioattivo e lo schermo era tale che i raggi α partenti dal primo non potevano arrivare al secondo. Con un microscopio tuttavia il RUTHERFORD osservò che sullo schermo fluorescente avvenivano scintillazioni. L'aspetto di queste scintillazioni, diverso da quello prodotto dalle par-

ticelle α, e la verifica coi campi elettrico e magnetico, disse che esse erano dovute a protoni molto veloci.

Il RUTHERFORD concluse che essi provenivano certamente dall'azoto, ma non erano un'impurità mescolata al gas.

Gli atomi di azoto colpiti dalle particelle α del radio C' subivano disintegrazione liberando protoni di grande energia.

Il rapporto fra il numero delle scintillazioni osservate sullo schermo e quello delle particelle α bombardanti risultò di 1 a un milione. La probabilità che per bombardamento con particelle α l'azoto si disintegri è quindi molto piccola.

Nonostante questo, il metodo fu giudicato buono e, nella forma primitiva o con particolari modificazioni, venne utilizzato per mettere in evidenza disintegrazioni di altri elementi come boro, fluoro, sodio, alluminio, fosforo. Gli sperimentatori furono ancora il RUTHERFORD e poi J. CHADWICK a Cambridge, G. KIRSCH e H. O. PETTERSON a Vienna.

Cosí si mise in evidenza che quasi tutti gli elementi della tavola periodica fino al potassio possono esser disintegrati mediante i raggi α. Fanno eccezione elio, litio, berillio, carbonio e ossigeno.

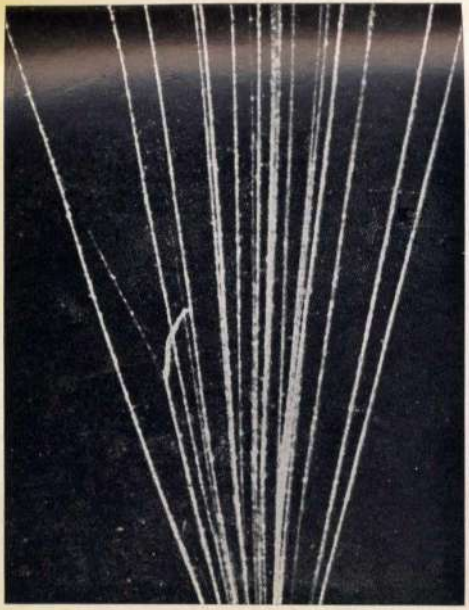
In tutti i casi i frammenti nucleari osservati furono i soli protoni. La loro energia dipendeva da quella delle particelle α incidenti e in alcuni casi la superava. Anche il numero degli atomi

disintegrati di un certo elemento è in relazione coll'energia delle particelle bombardanti e aumenta coll'aumentare di questa. Per particelle α con percorso totale inferiore a 3 cm d'aria in condizioni normali esso è quasi nullo. Gli elementi piú leggeri poi si disintegrano piú facilmente dei pesanti.

La camera di condensazione del WILSON, che di tanta utilità è stata nello studio dei processi radioattivi, ancora una volta ha offerto i suoi preziosi servigi per la rivelazione e l'analisi delle trasformazioni nucleari artificiali. Con essa P. BLACKETT riuscí infatti nel 1931 a fotografare le disintegrazioni dell'azoto e ricavare ulteriori notizie circa il loro meccanismo (Tavola IX, *a*).

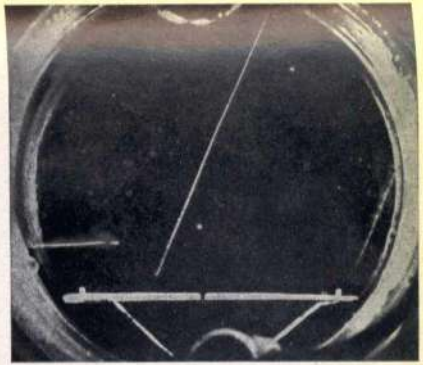
Il dispositivo poteva prendere una fotografia ogni 10 o 15 secondi. La sorgente era torio *B* mescolato a torio *C*; essa emette raggi α che in aria a pressione atmosferica hanno un percorso massimo compreso fra 4,8 e 8,6 cm. Fra le numerose traccie di collisioni elastiche di particelle α con atomi d'azoto il BLACKETT ne trovò alcune di tipo differente, rappresentanti appunto la proiezione di un protone dal nucleo disintegrato. Esse sono costituite da due diramazioni della traiettoria iniziale della particella incidente. Una di esse è sottile e lunga ed è prodotta dal protone liberato; l'altra grossa e corta rappresenta il rimbalzo del nucleo di nuova formazione.

Manca dopo l'urto il ramo della particella α



a) Collisione fra una particella α e un atomo di azoto con disintegrazione di quest'ultimo. La traiettoria sottile e lunga è quella del protone espulso dall'azoto, quella corta e grossa è dell'ossigeno a peso 17 (P. BLACKETT).

b) Traccia di un atomo di idrogeno liberato da uno schermo di paraffina bombardato con neutroni provenienti da una sorgente costituita da polonio a contatto con berillio (I. CURIE e F. JOLIOT).



c) Traccia di un atomo di azoto accelerato da neutroni (N. FEATHER).

d) Traccie dovute alla disintegrazione di un atomo di azoto bombardato con neutroni. La traccia lunga è della particella α espulsa, quella corta del boro a peso 11 formatosi (N. FEATHER).

incidente. Evidentemente questa, penetrata nel nucleo d'azoto, vi è rimasta catturata. Il nucleo resultante deve allora avere massa 17 e, se nessun elettrone è perduto nel processo, numero atomico 8, cioè eguale a quello dell'ossigeno. Questo naturalmente è stato controllato colle misure eseguite sulle traccie fotografate. L'angolo formato dai due rami della traccia non

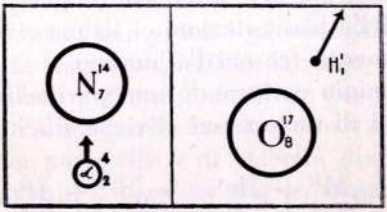


Fig. 67. — Schema illustrativo della disintegrazione dell'azoto sotto l'azione di particelle α. A sinistra l'atomo di azoto e la particella α, che sta per colpirlo. A destra l'atomo di ossigeno che si è formato e il protone espulso.

corrisponde a quello proprio di una semplice collisione elastica, e la lunghezza del ramo corto è in effetto quella che si può calcolare per un nucleo di massa 17 e carica 8. Dall'azoto si è cosí ottenuto un isotopo dell'ossigeno.

Si usa ormai esprimere questo avvenimento nucleare con un'equazione simile a quelle adoperate dai chimici per le loro reazioni:

$$_7N^{14} + {}_2He^4 \longrightarrow {}_8O^{17} + {}_1H^1$$

Il numero in alto a sinistra del simbolo dell'elemento rappresenta la massa, quello a destra in basso la carica del nucleo. La somma delle masse e quella delle cariche dei termini prima della disintegrazione deve eguagliare quella delle masse e delle cariche dopo la disintegrazione. La reazione nucleare scritta cosí ha valore puramente simbolico.

Altri particolari interessanti per la conoscenza delle trasmutazioni ci hanno rivelato alcuni elementi, fra cui l'alluminio.

L'alluminio catturando una particella α e liberandosi di un protone diviene silicio:

$$_{13}Al^{27} + {}_{2}He^{4} \longrightarrow {}_{14}Si^{30} + {}_{1}H^{1}$$

Ora per quanto bombardassero l'alluminio con raggi α perfettamente omogenei J. CHADWICH ed altri ottennero protoni liberi di quattro diversi percorsi in aria, cioè di quattro diverse energie.

I processi di disintegrazione dello stesso nucleo non sono dunque tutti eguali. L'interpretazione del fatto è però facile, se si ammette che nei nuclei le particelle α assumano livelli energetici diversi al momento della cattura, cosí come possono fare gli elettroni all'esterno del nucleo. Nel nucleo cioè esiste un livello normale proprio dello stato di equilibrio stabile e livelli superiori corrispondenti a eccitazione del sistema. I protoni a maggior percorso proverreb-

bero allora da un nucleo in cui la particella α è rimasta imprigionata senz'altro sul livello normale; gli altri invece proverrebbero da un nucleo in cui la particella α si è arrestata su un livello eccitato. In questo caso deve verificarsi anche emissione di raggi γ dovuti al cadere della particella dal livello superiore al normale, quando il nucleo si assesta nel suo stato di equilibrio finale. Naturalmente ci sarà una relazione fra il percorso dei protoni piú lunghi e meno lunghi e la frequenza della radiazione γ emessa.

Ancora con l'alluminio H. Pose pel primo ha notato un'altra particolarità: sotto bombardamento con particelle α di velocità diverse esso espelle gruppi di protoni che sembrano dovuti solo a particelle di velocità determinata fra quelle esistenti. Si tratterebbe di una risonanza fra l'energia di uno dei gruppi dei corpuscoli incidenti e quella di uno dei livelli su cui si trova il protone. In effetto se una particella α ha esattamente l'energia di uno dei livelli nucleari, la sua probabilità di penetrazione è maggiore che se la sua energia è piú alta o piú bassa di esso.

Il neutrone.

Le prime osservazioni sul disintegrarsi della materia sotto l'azione dei raggi α non erano però complete. E solo nell'estate del 1931 è stato dimostrato che da certi elementi i raggi α liberano un componente materiale prima assolutamente sconosciuto, se non impensato.

Esso è di massa press'a poco unitaria e a differenza di tutti gli altri componenti è neutro; per questo è stato chiamato neutrone.

Anche questa, come la massima parte delle scoperte, è stata fatta un po' per caso e ad essa hanno contribuito piú di uno dei grandi fisici

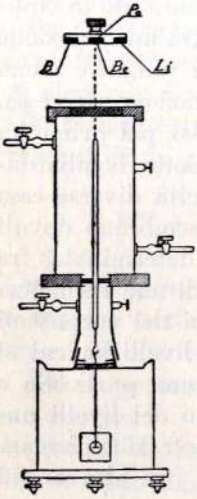


Fig. 68. — La disposizione con cui i JOLIOT hanno rilevato la presenza dei neutroni emessi dal berillio bombardato con le particelle α del polonio. L'elettrometro Hoffmann posto in basso è collegato con un elettrodo verticale al centro della camera di ionizzazione superiore. Questa è munita di rubinetti per l'introduzione dei gas che convengono alla ricerca. Nella parte superiore la parete è piú sottile e su di questa viene appoggiato il materiale idrogenato o i filtri. Tutto è sovrastato dal preparato *Po+Be*.

del giorno. W. BOTHE e A. BECKER bombardando con particelle α atomi di berillio notarono una debole radiazione secondaria molto penetrante. I. CURIE e F. JOLIOT vollero ricercare quali effetti avesse la nuova radiazione sulla materia (Fig. 68), ed osservarono che essa faceva espellere da una sostanza la cui molecola è ricca di idrogeno un grande numero di atomi di questo

elemento. In seguito si vide che quello che avveniva coll'idrogeno si ripeteva per tutte le sostanze; ossia che la nuova radiazione cedendo la propria energia accelerava gli atomi materiali che incontrava (Tav. IX, *b*, *c*).

Nessuna radiazione elettromagnetica nota fin qui è capace di far questo. D'altra parte se si ammette che essa sia di tale natura e che nell'urto contro atomi materiali produca un fenomeno analogo al comune effetto Compton (Capitolo II), che ha luogo fra raggi X (o γ) ed elettroni, si trova che il principio della quantità di moto non è soddisfatto.

J. CHADWICH mostrò che tutte le difficoltà vengono eliminate supponendo che la nuova radiazione sia costituita da neutroni.

Vediamo quale sia il processo che dà luogo all'emissione di neutroni dal berillio (Fig. 69).

Il nucleo di berillio, assorbita la particella α della sorgente radioattiva (in generale polonio, che emette raggi α di energia grandissima), espelle un neutrone e cosí diviene un nucleo a numero atomico 6 e peso 12, cioè carbonio. La energia liberata nella trasformazione è ripartita in energia cinetica del neutrone ed energia elettromagnetica (γ):

$$ {}_4Be^9 + {}_2He^4 \longrightarrow {}_6C^{12} + {}_0n^1. $$

Radiazione costituita da neutroni (e raggi γ) si è riscontrata anche, benché in quantità molto piccola presso litio, boro e fluoro, bombardati dalle particelle α del polonio.

Come è fatto il neutrone? E. RUTHERFORD, il

grande maestro della fisica nucleare, ne aveva già prima della sua scoperta supposto l'esistenza. Secondo la sua ipotesi il neutrone differiva dall'atomo di idrogeno solo perché l'elettrone del primo è piú strettamente legato al nucleo positivo. Oggi si è incerti di fronte a

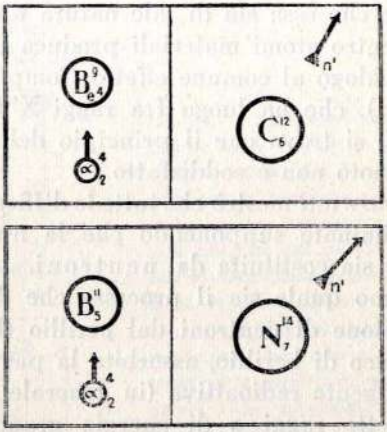


Fig. 69. — Schema illustrativo della disintegrazione di berillio e boro sotto l'azione di particelle α con emissione di neutroni. A sinistra il sistema prima della disintegrazione, a destra quello dopo che essa è avvenuta.

questa concezione. Forse il neutrone è un individuo privo di ogni complemento elettrico. La sua massa calcolata in base ai processi di disintegrazione, dai quali viene liberato, pare compresa fra 1,005 e 1,008 unità, ma ancora è aperta la discussione sul suo valore piú probabile.

Le disintegrazioni con protoni e con diploni veloci.

Il problema di lanciare contro gli atomi materiali protoni capaci di produrre effetti simili a quelli ottenuti con le particelle α si divide in due parti: 1° produzione dei protoni in quantità forte; 2° loro accelerazione.

La soluzione della prima parte è facile. L'idrogeno molecolare che la chimica insegna a liberare in mille modi, per esempio coll'elettrolisi di acqua acidulata, in una scarica elettrica di poche centinaia di volt si dissocia in atomi e questi in seguito si ionizzano. Perdono cioè l'unico loro elettrone e divengono appunto protoni.

Meno semplice è ottenere campi elettrici altissimi e stabili in cui introdurre questi nuclei, perché vengano accelerati convenientemente. Molti tentativi sono stati fatti allo scopo. Tra quelle che per i resultati ottenuti sono riuscite piú vantaggiose esaminiamo prima la disposizione realizzata da J. D. Cockcroft e E. T. S. Walton a Cambridge.

In sostanza il metodo consiste nel disporre in cascata quattro trasformatori di ognuno dei quali la tensione è raddoppiata e stabilizzata mediante valvole termoioniche e condensatori. Oltre l'isolamento degli stadi superiori la parte piú delicata del sistema sono le valvole termoioniche che non si trovano in commercio. La tecnica corrente delle alte tensioni, che è quella dei trasformatori per raggi X, non si vale in-

fatti di tensioni superiori a 250-300 mila volt. Qui gli autori hanno voluto raggiungere il milione di volt. L'insieme delle valvole termoioniche di COCKCROFT e WALTON è riuscito cosí quasi una torre costituita di quattro cilindri di vetro muniti internamente di convenienti elettrodi e in cui viene fatto e mantenuto il vuoto durante il funzionamento dell'apparecchio.

L'alta tensione cosí eccitata, applicata al tubo in cui si trovano liberi all'anodo i protoni, dà luogo a correnti dell'ordine di 10 milliampere.

C. GERTHSEN, E. O. LAWRENCE, D. H. SLOAN e J. THIBAUD hanno ideato un dispositivo fondato su un principio diverso. Invece di introdurre gli ioni di idrogeno direttamente in un unico campo elettrico elevatissimo, essi hanno pensato di farli passare attraverso a un grande numero di campi moderati, disposti successivamente l'uno all'altro. La velocità acquisita nel traversare il primo è aumentata dal secondo, e poi dal terzo e cosí via progressivamente.

Per opportuni accorgimenti costruttivi la stessa sorgente elettrica può alimentare tutti i campi che debbono esser percorsi dai protoni, e questi all'uscita dal dispositivo posseggono energia cinetica corrispondente alla tensione della sorgente moltiplicata pel numero dei campi in serie, attraversati.

È evidente che volendo far raggiungere ai protoni velocità molto grandi in questo modo bisogna sviluppare in lunghezza le dimensioni del

Digitized by Google

dispositivo, il che non è certamente agevole, né pratico. Gli americani LAWRENCE e LIVINGSTON hanno eliminato in maniera veramente geniale

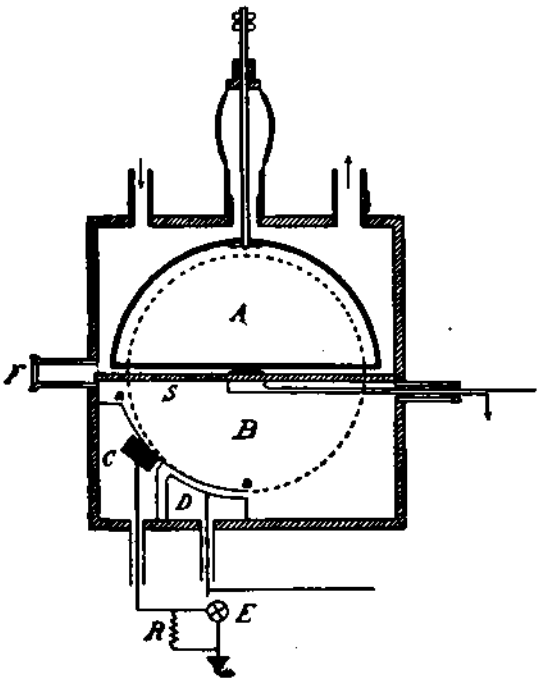


Fig. 70. — Disposizione di LAWRENCE e LIVINGSTON per accelerare i protoni.

questo inconveniente. Il loro dispositivo è costituito come segue (Fig. 70). Due settori semicircolari metallici e cavi *A* e *B* sono montati in piano e coi diametri affacciati entro un tubo a

Digitized by Google

vuoto. Ad essi è applicato un potenziale variabile con alta frequenza, che crea un campo elettrico oscillante nella regione compresa fra i due settori. Tutto il sistema è disposto fra i poli di un elettromagnete con le linee di forza perpendicolari al piano dei settori.

Ora è noto che una particella carica e animata di una certa energia cinetica in campo magnetico uniforme descrive con velocità costante un'orbita circolare in un tempo che dipende dal rapporto fra la carica e la massa della particella, dalla intensità del campo, ma è indipendente dalla sua velocità. Da questa dipende invece il raggio della traiettoria che essa percorre.

Un ione che si trovi a un certo istante nella regione fra i diametri dei due settori viene accelerato e spinto verso l'interno di uno di essi dal campo elettrico, mentre il campo magnetico lo dirige su una traiettoria circolare. Se l'intensità del campo magnetico è tale che il tempo impiegato dall'ione a percorrere il semicerchio è uguale al semiperiodo delle oscillazioni elettriche, l'ione esce dal settore all'istante in cui il campo elettrico si è invertito. Esso allora viene accelerato verso l'altro elettrodo e descrive in questo ancora un semicerchio di raggio maggiore del precedente per l'aumentata sua velocità.

Poiché il tempo impiegato a descrivere le orbite è indipendente dalla velocità, l'ione esce ancora nella regione fra i due diametri quando

il campo elettrico ha cambiato polarità; sarà quindi di nuovo accelerato e cosí di seguito. In definitiva l'ione descrive entro i due settori una spirale (Fig. 71) fino a che viene raccolto e utilizzato. La sua energia cinetica finale sarà eguale alla tensione fra i due settori moltipli-

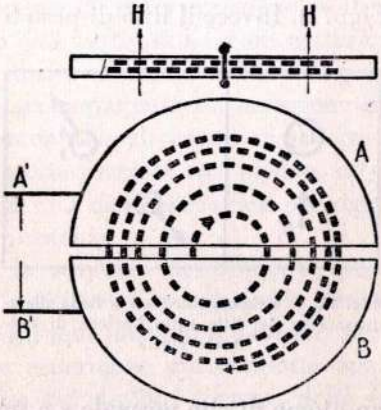


Fig. 71. — Traiettoria dei protoni accelerati con la disposizione di LAWRENCE e LIVINGSTON.

cata pel doppio del numero dei semigiri compiuti.

LAWRENCE e LIVINGSTON hanno cosí ottenuto protoni di 1220 chilovolt facendo loro compiere circa 150 giri completi entro i settori fra cui erano applicati solo 10 mila volt. Ormai con questa disposizione si ottengono anche protoni di piú milioni di volt.

Resultati notevolissimi si sono ottenuti con protoni di cosí grande energia quale è quella realizzata a Cambridge e in America.

COCKCROFT e WALTON col loro dispositivo misero in evidenza che sotto l'azione di protoni accelerati gli atomi di litio a massa 7, catturato il protone incidente, si scindono in due particelle α (Fig. 72). Invece il litio di peso 6 darebbe

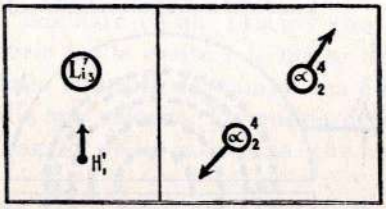


Fig. 72. — Schema illustrativo della disintegrazione del litio sotto l'azione di protoni veloci.

luogo a un atomo di elio normale e a un isotopo dell'elio di peso 3. Pel litio le equazioni che rappresentano la trasmutazione possono scriversi:

$$_3Li^7 + {}_1H^1 \rightarrow 2\,{}_2He^4 \qquad {}_3Li^6 + {}_1H^1 \rightarrow {}_2He^4 + {}_2He^3$$

COCKCROFT e WALTON hanno lavorato con protoni di centinaia di chilovolt, ma H. RAUSCH VON TRAUBENBERG ha visto che il litio si disintegra anche con protoni di soli 13 chilovolt d'energia. Questo dipende naturalmente dal valore relativamente basso della barriera di potenziale che circonda il nucleo del litio. Ma il rendimento

del processo è cosí molto scarso e, se bastano per produrlo strumenti meno grandiosi di quelli in uso a Cambridge, occorre però che essi sopportino intensità fortissime di correnti protoniche per dare resultato sensibile.

Altri elementi come boro, fluoro, alluminio si disintegrano se bombardati con protoni veloci, e il processo di disintegrazione è, in generale, lo stesso per tutti: si ha cioè cattura del protone incidente ed emissione di una particella α, talvolta accompagnata da emissione di raggi γ.

La percentuale di atomi disintegrati è però sempre molto piccola: con protoni di 400 chilovolt si ha una disintegrazione per ogni 100 milioni di protoni.

Dopo la scoperta dell'idrogeno pesante (*diplogeno* o *deuterio*) era naturale pensare a utilizzarne gli ioni (*diploni* o *deutoni*) per eseguire le stesse esperienze già condotte con protoni. L'efficacia dei diploni a causa della loro maggiore massa avrebbe dovuto essere piú grande e la diversa costituzione del nucleo aggressore avrebbe certo portato a resultati nuovi.

Cosí in luogo dei protoni o, per meglio dire, mescolati ai protoni vennero a Cambridge e in America introdotti nei tubi di scarica i diploni.

E il litio a peso 6 bombardato con diploni di qualche milione di volt si scisse in due particelle α, come fa il litio 7 bombardato con protoni:

$$ {}_3Li^6 + {}_1D^2 \rightarrow 2\,{}_2He^4 . $$

Il litio però può presentare anche due altre reazioni:

$$_3Li^6 + {}_1D^2 \rightarrow {}_3Li^7 + {}_1H^1$$
$$_3Li^7 + {}_1D^2 \rightarrow 2\,{}_2He^4 + {}_0n^1.$$

I diploni possono cioè dar luogo sia a emissioni di protoni, che di neutroni. Questo che avviene anche presso altre reazioni nucleari direbbe che non tutto il diplone resta imprigionato nel nucleo colpito, ma solo una delle sue parti costituenti. Il diplone stesso nell'urto talvolta forse si spezza, cosa che non avviene mai alla particella α.

L'uso dei diploni ha permesso alla scuola di Cambridge di confermare l'esistenza dell'isotopo dell'elio di massa 3, di identificare due ulteriori isotopi, uno ancora dell'elio, a massa 5, e uno dell'idrogeno, a massa 3.

Disintegrazione per neutroni.

La scoperta del neutrone è di un'importanza ancora oggi incalcolabile per la fisica nucleare. Inviare nei nuclei particelle cariche è cosa che riesce, ma trova un limite nelle stesse forze repulsive fra il nucleo aggredito e il suo aggressore. Queste forze crescono col crescere del numero atomico dell'elemento e presto divengono cosí grandi che la probabilità della particella α o del protone di avvicinarsi al nucleo diviene piccolissima o nulla. Per questa ragione con particelle α non si verificano disintegrazioni di

atomi al di là del potassio e con protoni solo fra i primi dieci elementi si è ottenuto qualche resultato positivo. Nel caso del neutrone questa difficoltà non esiste. Per l'assenza di cariche nella sua compagine, il neutrone rimane indifferente di fronte alle barriere positive che i nuclei oppongono a loro difesa. Forze fra neutrone e nuclei si manifestano solo a piccolissime

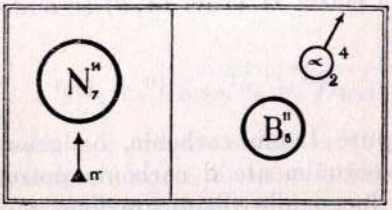


Fig. 73. — Schema illustrativo della disintegrazione dell'azoto bombardato da neutroni.

distanze, cioè quando il neutrone è già sulla soglia del sistema nucleare, e allora esse sono attrattive.

Il neutrone è quindi un aggressore ideale; contro le sue armi non ci sono difese. L'unica limitazione a cui deve sottostare è quella presentata dalle leggi del caso, cioè dalla probabilità di incontrare un nucleo sul suo percorso.

Queste rosee previsioni sulla efficacia del neutrone come disintegratore della materia sono state coronate dalla piú brillante conferma sperimentale e in questo paragrafo solo una parte delle imprese del nuovo corpuscolo vengono

prese in considerazione. Ad esso spetta anche molto di quanto è detto nel capitolo IX.

Le prime osservazioni sulla capacità di disintegrazione dei neutroni sono state eseguite da N. FEATHER e da L. MEITNER con la camera di condensazione del WILSON. Il neutrone viene catturato dall'atomo che incontra e questo emette in generale una particella α.

L'azoto per esempio in tal modo si trasforma in boro a massa 11 (Tav. IX, *d*) secondo la reazione.

$$_7N^{14} + {}_0n^1 \rightarrow {}_5B^{11} + {}_2He^4$$

Cosí pure fanno carbonio, ossigeno, fluoro, neon. Eventualmente il carbonio potrebbe anche dar luogo alla disintegrazione rappresentata dalla relazione:

$$_6C^{12} + {}_0n^1 \rightarrow 2\,{}_2He^4 + {}_2He^5.$$

In questo caso cioè si manifesterebbe l'isotopo dell'elio a peso 5, già supposto presente nelle disintegrazioni per diploni.

Come è stato notato quasi tutte le disintegrazioni hanno luogo in seguito a cattura della particella bombardante da parte del sistema bombardato. Un caso solo si conosce in cui questo non avviene e si ha quando con $_2He^4$ viene bombardato il diplogeno, il quale senz'altro si scinde nei suoi componenti:

$$_1D^2 + {}_2He^4 \rightarrow {}_1H^1 + {}_0n^1 + {}_2He^4.$$

Tuttavia nel caso dei neutroni si dubita che in qualcuno dei processi osservati possa non verificarsi la cattura del neutrone bombardante.

In tal caso l'azoto per emissione di un protone diverrebbe carbonio 13, e il carbonio 12 si scinderebbe in tre particelle α:

$$_7N^{14} + {}_0n^1 \rightarrow {}_6C^{13} + {}_1H^1 + {}_0n^1$$

$$_6C^{12} + {}_0n^1 \rightarrow 3\,{}_2He^4 + {}_0n^1$$

La disintegrazione per raggi γ e raggi X di grande energia.

Molte volte si è provato se coi raggi γ si riuscisse a scindere i nuclei atomici. Ma anche coi raggi piú energici e le sorgenti piú intense i resultati sono parsi negativi.

CHADWICK e GOLDHABER furono i primi a osservare nel 1934 una disintegrazione nucleare prodotta da raggi γ. In una piccola camera di ionizzazione riempita di idrogeno pesante essi facevano pervenire i raggi γ del torio *C''*, che hanno energia di 2,6 milioni di volt. La camera era connessa a un amplificatore lineare e a un oscillografo. Essa poteva dare impulsi di corrente solo per azione di particelle ionizzanti il gas.

In effetto gli autori in queste condizioni notarono impulsi che erano dovuti a protoni. Essi suppongono che il diplone sotto l'azione dei raggi γ usati si spezzi appunto in neutrone e pro-

tone. Questo solo componente è stato messo in evidenza. L'equazione della reazione nucleare è appunto:

$$ {}_1D^2 + h\nu \rightarrow {}_1H^1 + {}_0n^1. $$

Da prove eseguite con radiazioni di minore energia resulta che lo stesso effetto non può essere raggiunto con energie inferiori a 1,8 milioni di volt.

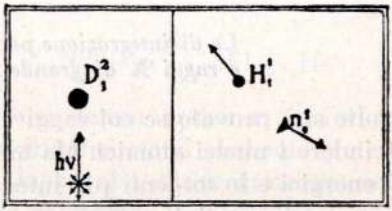


Fig. 74. — Schema illustrativo della scissione del diplogeno colpito da raggi γ.

Analogo resultato hanno ottenuto L. SZILARD e T. A. CHALMERS con berillio irraggiato mediante i raggi γ uscenti da un preparato di radio rinchiuso in capsula di platino. Dal berillio in questo caso verrebbero liberati neutroni.

E si annuncia che anche con raggi X di qualche milione di volt d'energia, ossia in sostanza con raggi γ artificiali, si sia pervenuti ad estrarre dalla materia neutroni.

Se, come sembra da questi primi resultati, l'azione della radiazione elettromagnetica si esercita in modo speciale sui neutroni contenuti nel

nucleo degli elementi, sono pienamente giustificati gli scacchi subíti dai primi ricercatori in questo campo. Il nuovo corpuscolo, di cui l'esistenza era insospettata, ha proprietà assai singolari; difficile era quindi rivelarlo con le conoscenze e gli strumenti di cui si disponeva fino a poco tempo fa.

La struttura nucleare e i raggi β.

La radioattività spontanea sembrava indicare che i componenti elementari dei nuclei atomici fossero le particelle α e gli elettroni.

La disintegrazione artificiale della materia ha accertato che il nucleo si può scomporre in protoni e neutroni, talvolta riuniti insieme in gruppi, equivalenti a una particella α.

Gli elettroni in questo gioco di scambio fra aggressore e aggredito non sono mai comparsi. Si può veramente dubitare, che questi corpuscoli cosí imbarazzanti per l'interpretazione della radioattività tipo β (Cap. VI) siano un costituente dei nuclei atomici.

Già W. Heisenberg ed E. Majorana hanno tentato di farne a meno e hanno studiato le condizioni di stabilità di un sistema nucleare composto solo di protoni e neutroni. Ma come mai il nucleo espelle elettroni, se non ne possiede?

La difficoltà si elimina pensando che gli elettroni si formino nel nucleo quando ha luogo un processo speciale e ne escano immediatamente appena si sono formati.

Le particelle pesanti neutrone e protone sa-

rebbero due stati energetici di un medesimo corpuscolo: si passerebbe dal neutrone al protone quando viene emesso un elettrone, come nell'atomo si passa da un livello eccitato a quello, per esempio, normale, quando viene lanciato fuori un quanto di radiazione.

L'elettrone esiste dunque nel nucleo allo stesso modo con cui esiste nell'atomo il quanto: cioè in uno stato potenziale e non con le apparenze cno cui si manifesta all'esterno.

Su quest'ipotesi E. FERMI ha costruito una teoria della disintegrazione β dei corpi radioattivi. In essa perché sia soddisfatta la relazione delle quantità di moto delle parti che prendono parte alla transizione neutrone-protone si richiede che al liberarsi dell'elettrone si crei un altro ente di massa pressocché nulla, privo di carica elettrica, ma dotato di momento meccanico. Esso è il così oltep neutrino, preconizzato già da PAULI.

I mezzi sperimentali a nostra disposizione non permettono di accertare se questo individuo energico ma evanescente abbia un'esistenza reale: certo è che l'ammetterne la presenza accanto a quella dell'elettrone pare che aggiusti molte cose.

Per esso infatti il FERMI riesce a calcolare la distribuzione dell'energia fra i raggi β espulsi dai nuclei radioattivi e a ottenere curve teoriche che si accordano abbastanza bene con le sperimentali.

Con questa giustificazione relativa agli elet-

troni, la concezione di un nucleo fatto solo di neutroni e protoni acquista consistenza e ispira fiducia.

L'insieme dei protoni definisce il numero atomico dell'elemento: la somma di protoni e neutroni ne dà la massa. Due isotopi differiscono fra loro solo pel numero dei neutroni.

Abbiamo cosí uno schizzo abbastanza completo per quanto grossolano della struttura nucleare.

Parlare di essa piú a lungo sarebbe immaturo e inopportuno in questo momento in cui le conoscenze sperimentali relative ai fenomeni nucleari si vanno raccogliendo in modo cosí farraginoso da non consentire ancora di procedere a tranquille speculazioni conclusive.

CAPITOLO VIII

LA RADIAZIONE COSMICA

Introduzione. La scoperta dei raggi cosmici. Il periodo fisico dello studio dei raggi cosmici. I dubbi sulla natura dei raggi cosmici. La radiazione cosmica contiene corpuscoli. Reazioni fra raggi cosmici e materia. L'elettrone positivo. La materializzazione dell'energia radiante.

L'ATOMO, l'indivisibile, è stato diviso in elettroni e nucleo materiale. Gli elettroni atomici sono stati contati, classificati, estratti dall'atomo lanciati nello spazio, misurati, pesati, considerati come corpuscoli, come trottole, e infine trasformati in onde. Con tutto questo essi ci appaiono alquanto monotoni e ormai poco sfruttabili.

Grandi speranze invece si ricavano dai primi approcci col nucleo, la parte veramente pesante dell'atomo. Intanto esso presenta una maggiore varietà di contenuto dell'atmosfera esterna: particelle α, protoni, neutroni. Cosa ancora rivelerà il nucleo? La nostra curiosità, destata dalle trasformazioni naturali della materia, si è acuita dopo i successi ottenuti nei tentativi di disintegrazione artificiale. Per soddisfare questa curiosità cerchiamo la chiave dello scrigno segreto, per essa vogliamo imparare a pronunziare il « Sesamo apriti » che ci introduca fra le meraviglie del giardino nucleare.

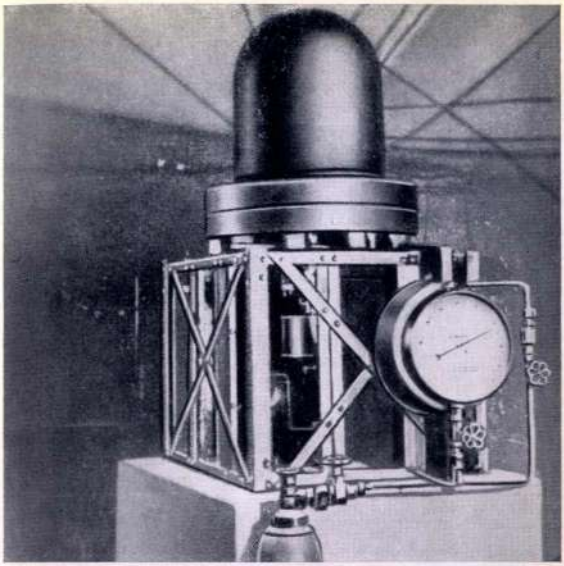
A tale scopo non trascuriamo nessuna fatica; ci guardiamo intorno con una attenzione che non ha mai forse avuta l'eguale e cogliamo an-

che i piú tenui e strani segnali che pervengono ai nostri mezzi di ricezione artificiale, tanto piú sensibili dei naturali.

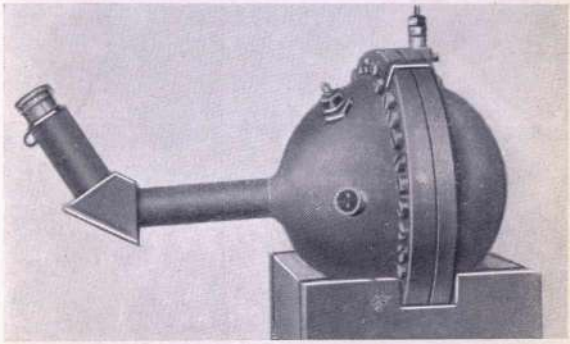
Col problema della struttura della materia è certamente connesso un fenomeno che è stato rivelato ai primi del novecento, ma che in questo momento raccoglie un enorme contributo di studi e ricerche. Esso è noto colla denominazione di raggi cosmici o radiazione penetrante. Fino al 1924 ad esso sono stati dedicati 106 lavori di una certa importanza, dal 1924 ad oggi i lavori che si occupano dei raggi cosmici superano il numero di 400, e ben presto, se si continua di questo passo, si arriverà al migliaio.

Le osservazioni di osservatori isolati sono sostituite da organizzazioni di tipo astronomico. Il laboratorio di fisica non basta piú; ci vogliono istituti speciali, ci vogliono spedizioni dal polo all'equatore, dalla superficie, o diciamo meglio, dalle profondità della terra agli estremi limiti dell'atmosfera.

I fragili strumenti che debbono cogliere le minime segnalazioni cosmiche, camere di ionizzazione ed elettrometri, debbono esser schermati con corazze di spessore inusitato, debbono esser rinchiusi in involucri resistenti come bombe (Tav. X) e, quando l'uomo non li può accompagnare nel cielo o sotto le acque dei laghi e dei mari, debbono esser affidati a palloni o a sommergibili di particolare struttura, forniti di disposizioni automatiche di registrazione.



a) Disposizione di Kolhörster per lo studio della radiazione cosmica.



b) Involucro contenente l'elettrometro di Millikan per lo studio dei raggi cosmici.

Abbiamo parlato di organizzazioni a carattere astronomico. Gli astronomi che si propongono di esaminare da punti diversi della terra le manifestazioni di un astro prendono accordi e stabiliscono la parte spettante ad ognuno nell'osservazione dei messaggi luminosi, che invia l'astro agli uomini. Ma il fisico, che si occupa della radiazione penetrante, si trova in una condizione di inferiorità rispetto all'astronomo. Egli non sa quale sia la porzione del cielo che gli invia il messaggio e non sapeva nemmeno fino a pochi mesi or sono di che sorta di messaggio si trattasse. Ancora oggi del resto il cifrario che ne permetta la lettura è oggetto di viva discussione.

La scoperta dei raggi cosmici.

Nel 1903 il RUTHERFORD, che già si occupava di radioattività e doveva quindi usare elettroscopi sensibilissimi, si accorgeva che essi si scaricavano lentamente, anche se erano ben difesi e ben isolati. L'aria atmosferica diviene conduttrice anche indipendentemente dalle sostanze radioattive che contiene o dai raggi ultravioletti che riceve dal sole. Nell'atmosfera esiste dunque una radiazione, che è capace di compiere il lavoro della sua ionizzazione. La presenza di questa radiazione ha attratto subito l'attenzione dei meteorologi, che desideravano rendersi conto delle origini dell'elettricittà atmosferica, la quale presenta particolarità giustificabili, ma

anche fenomeni di cui non si trovava la ragione precisa.

I fisici erano allora in altri problemi affaccendati e in fatto di radiazioni sapevano ancora troppo poco per mettersi a studiare *ex professo* il nuovo mistero affacciantesi all'orizzonte. Non sono tuttavia mancate ipotesi piú o meno ingegnose sull'origine di questa radiazione, che è stata subito e troppo in fretta giudicata di natura elettromagnetica e simile ai raggi γ provenienti dalle sostanze radioattive, per quanto di potere penetrante piú elevato. Il CAMPBELL nel 1906 sostenne per esempio che essa proveniva da una radioattività di tutta la materia da cui siamo circondati. Vedremo che la cosa non si può sostenere; la radiazione penetrante è d'origine extraterrestre.

Il periodo, che chiameremo meteorologico, dello studio della radiazione penetrante, se ha dato una gran massa di osservazioni, non ha potuto portare a conclusioni molto definite in parte forse per l'insufficienza degli strumenti di misura, in parte per la mancanza di coordinazione nelle misure. Val la pena di ricordare che fra i lavori appartenenti a questo primo periodo sono notevoli quelli eseguiti dal nostro PACINI sul lago Trasimeno.

Il periodo fisico dello studio dei raggi cosmici.

Frutti notevoli dalle ricerche sulla radiazione penetrante si sono cominciati a raccogliere

quando si è iniziato il periodo fisico. Le cose parlano quando sono interrogate nella lingua che ad esse conviene. In questo senso si può forse sostenere che la realtà ce la creiamo da noi.

Per quanto fra il 1910 e il 1914 già KOLHÖRSTER, HESS ed altri avessero eseguito ricerche serie sulle manifestazioni a diversa altezza dal livello del mare della radiazione cosmica, possiamo dire che il periodo fisico della ricerca è stato inaugurato da Carlo MILLIKAN di Pasadena in America nel 1923. Il MILLIKAN è stato un tempista. Egli ha sentito che era giunto il momento buono anche per la radiazione penetrante. La maturità di idee raggiunta in fatto di concezioni circa gli irraggiamenti e le radiazioni, la perfezione delle tecniche di ricerca, la varietà dei metodi di indagine che si avevano ormai a disposizione non potevano non render di moda l'affascinante problema.

Cosí il MILLIKAN si costruí una camera di ionizzazione robusta e delicata (Tav. X, *b*) e la portò in cima a montagne del Nord America e la affondò nelle profondità di laghi alpini, le cui acque, provenienti da scioglimento di nevi erano prive di radioattività.

Egli vide cosí che la radiazione decresceva di intensità man mano che aumentava lo spessore di acqua interposto (Fig. 75).

Dalle esplorazioni atmosferiche di KOLHÖRSTER e MILLIKAN e dalle stratosferiche di PICCARD e suoi allievi resulta che invece l'inten-

sità cresce man mano che ci si allontana dalla Terra (Fig. 76).

Questo prova che la radiazione penetrante non proviene da una proprietà generale della materia che si trova sulla Terra, ma che essa è originata da fenomeni che si sviluppano all'esterno di essa, negli spazi cosmici stellari e interstellari.

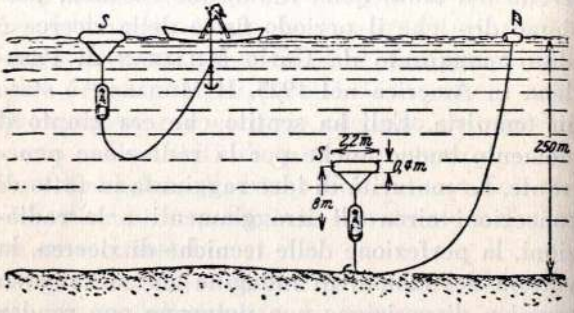


Fig. 75. — Sommergibili per gli apparecchi misuratori dell'intensità dei raggi cosmici in acqua.

L'analisi della curva d'assorbimento della radiazione in acqua rivelò al MILLIKAN che la radiazione non era semplice, ma costituita di componenti diversamente assorbibili. Egli, pertanto, nell'ipotesi che si trattasse di una manifestazione elettromagnetica, giudicò che l'energia media corrispondente a un quanto di radiazione penetrante era di 25 milioni di volt. L'ordine di grandezza di tale quanto è superiore a quello di qualunque altro quanto conosciuto fino ad ora. Supera di mille volte anche il quanto

della radiazione γ piú dura, cioè della radiazione γ emessa dal torio C''.

L'origine di questo quanto non poteva esser dunque una delle origini note alla fisica dei laboratori. Il MILLIKAN pensò che essa provenisse dalla riunione in atomi di elio di protoni

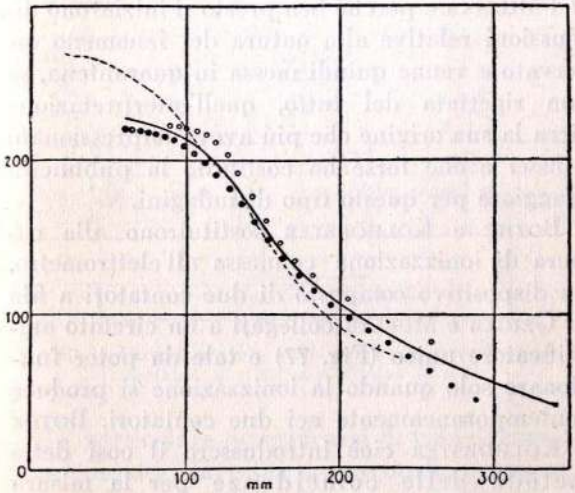


Fig. 76. — Curve indicanti come l'intensità dei raggi cosmici (asse delle ordinate) cresce con l'altezza. Questa è data dalla pressione atmosferica equivalente misurata in mm di mercurio (ascisse).

vaganti negli spazi interstellari. Il calcolo della energia che si sviluppa quando quattro masse unitarie si associano, eseguito con la relazione relativistica di equivalenza fra massa ed energia (Cap. IV e Cap. VI), porta appunto a un valore dell'energia radiante di 25 milioni di volt.

I dubbi sulla natura dei raggi cosmici.

I resultati e le interpretazioni del MILLIKAN fecero molto rumore e naturalmente indussero molti ricercatori a ripetere le esperienze con mezzi diversi. Cominciarono allora i dispiaceri del MILLIKAN, perché ben presto si iniziarono discussioni relative alla natura del fenomeno osservato e venne quindi messa in quarantena, se non rigettata del tutto, quell'interpretazione circa la sua origine che piú aveva impressionato i fisici e che forse ha costituito la pubblicità maggiore per questo tipo di indagini.

BOTHE e KOLHÖRSTER sostituirono alla camera di ionizzazione connessa all'elettrometro, un dispositivo composto di due contatori a filo di GEIGER e MÜLLER collegati a un circuito amplificatore unico (Fig. 77) e tale da poter funzionare solo quando la ionizzazione si produce contemporaneamente nei due contatori. BOTHE e KOLHÖRSTER cioè introdussero il cosí detto metodo delle coincidenze per la misura dell'intensità della radiazione penetrante.

Ora quale è la differenza peculiare fra questo e gli strumenti usati dal MILLIKAN e dagli altri autori? Le grandi camere di ionizzazione contenenti gas ad alta pressione non permettono in generale di distinguere fra i quanti e i corpuscoli che ricevono.

Invece un contatore di GEIGER e MÜLLER, che ha sempre proporzioni limitate e contiene aria a pressione di pochi centimetri di mercurio dif-

ficilmente funziona per azione diretta di un quanto. Esso nella struttura normale conta solo particelle veloci che lo attraversano.

Queste possono esser state liberate nei dintorni dello strumento da una radiazione γ, ma possono anche essere indipendenti e di origine primaria.

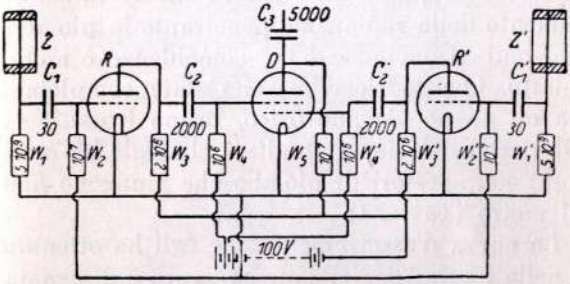


Fig. 77. — Disposizione pel funzionamento in coincidenza di due contatori di GEIGER e MÜLLER (Z e Z').

In particolare il verificarsi di coincidenze fra due contatori investiti da particelle è una questione di probabilità. Questa probabilità cambia a seconda che i contatori sono traversati dalla stessa particella o da due particelle liberate allo stesso istante nel gas circostante. La prima è inferiore alla seconda. Precisamente BOTHE e KOLHÖRSTER trovarono che in pratica si ottiene un numero di coincidenze corrispondente proprio al passaggio di un'unica particella nei due contatori. Essi conclusero pertanto che quanto rivela il loro dispositivo è

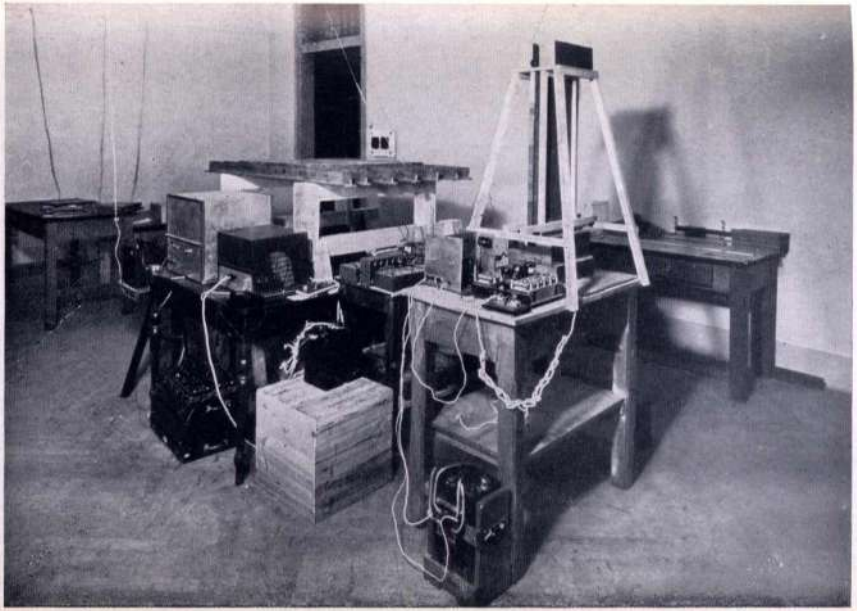
radiazione corpuscolare, che potrebbe anche non esser stata prodotta nelle vicinanze del contatore.

Coincide questa radiazione corpuscolare con la radiazione penetrante del MILLIKAN o è una radiazione secondaria prodotta da essa nell'atmosfera? Gli stessi autori hanno, allo scopo di risolvere la questione, eseguito misure di assorbimento della radiazione penetrante in piombo, per cui il metodo delle coincidenze è molto adatto. Queste ricerche sono state completate da un nostro giovane fisico, Bruno ROSSI, e ci riferiremo perciò ai resultati che egli ha ottenuto con spessori di piombo che giungono fino al metro (Tav. XI).

La curva d'assorbimento che egli ha ottenuta è nella figura 78. Nella stessa figura è disegnata la curva d'assorbimento ricavata dal MILLIKAN in acqua. Entro gli errori di osservazione e tenendo conto della differenza di condizioni sperimentali, si può dire che le due curve coincidono.

Bisogna dunque concludere che la radiazione corpuscolare osservata è da identificare con la radiazione primaria oppure che la radiazione primaria ultra-gamma che la genera viene assorbita dai primi strati dell'atmosfera; cosicché anche in questo caso quella che giunge al livello del mare è sostanzialmente una radiazione corpuscolare.

Sulla base però delle attuali conoscenze appare assai difficilmente spiegabile come una



Apparecchi di B. Rossi (R. Università di Padova) per lo studio della radiazione cosmica. A destra la disposizione per le determinazioni di assorbimento in piombo.

radiazione γ capace di generare raggi corpuscolari di penetrazione media superiore a 1,5 m di piombo possa avere un coefficiente di assorbimento in aria tanto elevato da non giungere con apprezzabile intensità al livello del

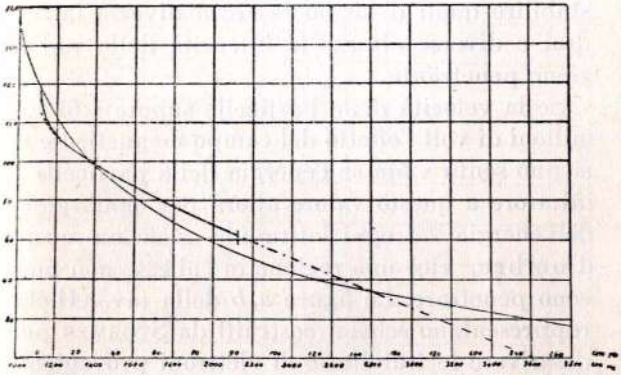


Fig. 78. — Confronto fra la curva dell'assorbimento in acqua (MILLIKAN) e in piombo (ROSSI). Questa curva è la piú breve, estrapolata con linea punteggiata.

mare. Unica alternativa ammissibile per giustificare l'assenza della radiazione primaria dalle segnalazioni terrestri è quella che essa non venga registrata dai nostri strumenti.

La radiazione cosmica contiene corpuscoli.

Contrasta tuttavia con questo accomodamento interpretativo il resultato di altre indagini. Se la radiazione penetrante è corpuscolare e i cor-

puscoli non si formano *in situ*, ma vengono da lontano, essi debbono risentire l'azione del campo magnetico terrestre. Questo si traduce in una differenza di intensità della radiazione a latitudini diverse. Esistono calcoli eseguiti da FERMI e ROSSI e da LEMAITRE e VALLARTA per stabilire quali debbano essere a diverse latitudini e diverse altezze le intensità della radiazione penetrante.

Se la velocità delle particelle supera i 61 500 milioni di volt l'effetto del campo magnetico non si può sentire. Ma se l'energia delle particelle è inferiore a questo valore allora per ogni valore dell'energia, ad ogni latitudine esiste un cono d'ombra, cioè una regione in cui esse non possono penetrare. Le figure *a*, *b* della tav. XII che rappresentano schemi costruiti da STÖRMER per descrivere le traiettorie di elettroni provenienti dal sole, ci daranno un'idea del modo di formarsi del cono d'ombra in un determinato punto della Terra. Questo cono per le particelle di una certa energia ha apertura crescente dal polo verso l'equatore. Se si tien conto che le misure sono fatte con particelle di tutte le energie che possono traversare l'atmosfera sovrastante il luogo di osservazione, si prevede, che, procedendo dal polo magnetico verso l'equatore, l'intensità totale della radiazione penetrante, osservata a una data altezza dal livello del mare, deve rimaner costante fino a quella distanza dall'equatore dove il campo magnetico terrestre comincia ad impedire l'arrivo di alcuni dei cor-

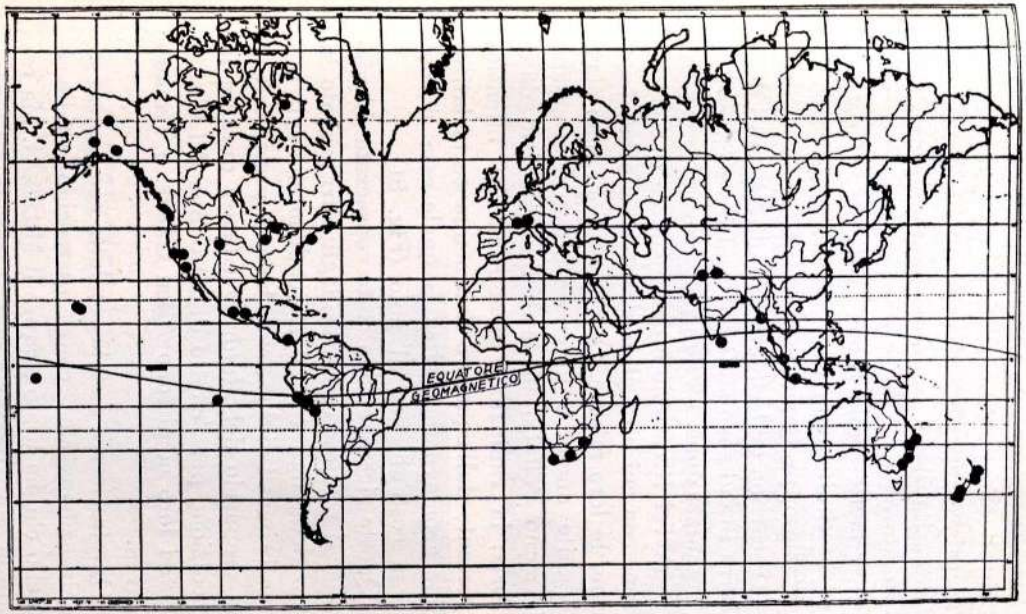


Fig. 79. — Cartina con le stazioni (punti segnati ●) sede di osservatori per lo studio della variazione di intensità dei raggi cosmici a diverse latitudini geomagnetiche, e diverse altezze.

puscoli che potrebbero traversare lo strato di atmosfera superiore. A partire da questo punto l'intensità deve diminuire gradatamente verso l'equatore.

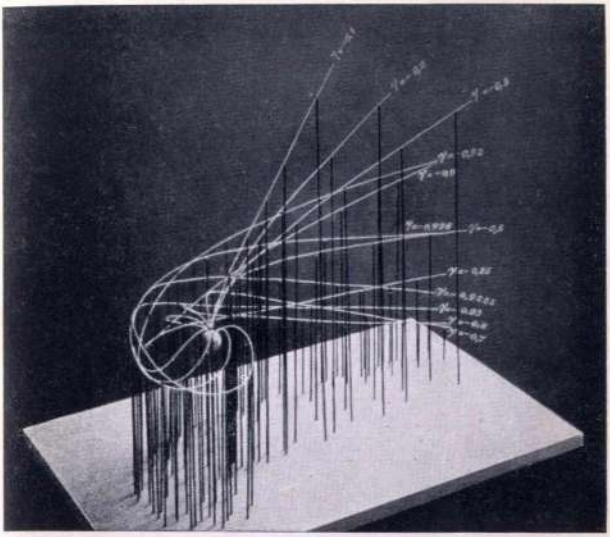
Per mettere alla prova la teoria, il COMPTON ha costituito una organizzazione di carattere grandioso, prettamente americano.

La cartina della figura 79 indica i punti della Terra in cui sono stati posti gli osservatori dell'organizzazione. La figura 80 riproduce lo schema dell'elettroscopio e della camera di ionizzazione con cui tutti gli osservatori associati facevano le loro misure. Le osservazioni sono state eseguite anche a diverse altezze. Tutte confermano l'effetto di latitudine previsto dalla teoria: la radiazione penetrante ha intensità crescente dall'equatore fino a una certa latitudine geomagnetica, oltre la quale essa si conserva costante fino al polo (Fig. 81).

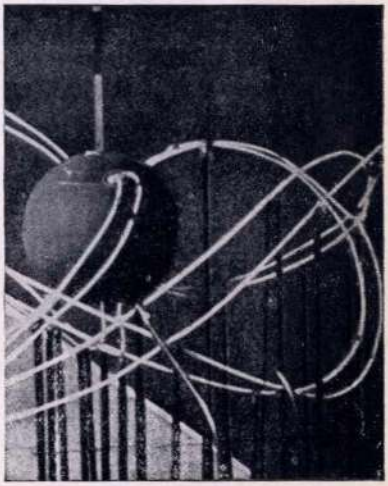
Queste ricerche sono state consacrate da vittime. Il punto che scarta dagli altri segnato in alto della figura 81 è stato dedotto dagli appunti rimasti di due fisici che sono precipitati in un crepaccio del *Muldrow Glacier* durante la spedizione per l'effetto di latitudine del COMPTON: i loro nomi sono Allen CARPE, e Teodoro COVEN.

Questa ricerca è stata condotta con camera di ionizzazione, cioè con apparecchio simile a quello che ha usato sempre il MILLIKAN. Ma resultato equivalente ha dato il metodo dei conta-

a)



b)



Traiettorie dei raggi catodici provenienti dal sole nel campo magnetico terrestre (sec. Störmer); la fotografia a destra è un particolare di quella superiore.

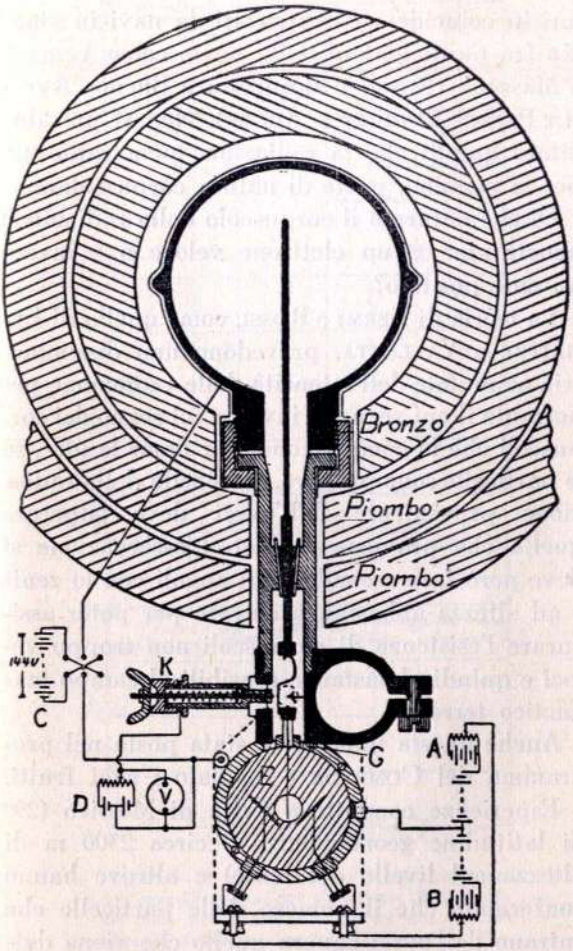


Fig. 80. — Lo strumento usato nella organizzazione del COMPTON per la ricezione della radiazione cosmica (camera di ionizzazione connessa a un elettrometro).

tori in coincidenza trasportati da navi in viaggio fra punti lontani della terra, come Venezia e Massaua (ROSSI) o Bordeaux e Buenos Ayres (LE PRINCE RINGUET e AUGER). Non si può dubitare quindi che la radiazione penetrante sia per la massima parte di natura corpuscolare.

Di che natura è il corpuscolo della radiazione penetrante? È un elettrone veloce o è invece un ente positivo?

La teoria di FERMI e ROSSI, come quella di LEMAÎTRE e VALLARTA, prevedono una dissimmetria azimutale dell'intensità della radiazione penetrante il cui segno si inverte col segno dei corpuscoli che la compongono. Per fissar le idee, se le particelle sono positive, l'intensità della radiazione proveniente dall'ovest deve superare quella che proviene dall'est. L'osservazione si deve però fare secondo certi angoli con lo zenit e ad altezza abbastanza elevata per poter assicurare l'esistenza di corpuscoli non troppo veloci e quindi abbastanza sensibili al campo magnetico terrestre.

Anche questa indagine è stata posta nel programma del COMPTON e ha dato i suoi frutti.

Esperienze condotte a Città di Messico (29° di latitudine geomagnetica e circa 2300 m di altezza sul livello del mare) e altrove hanno confermato che il numero delle particelle che entrano dall'ovest supera quello che viene dall'est: la differenza è piú volte l'errore sperimentale. La massima parte della radiazio-

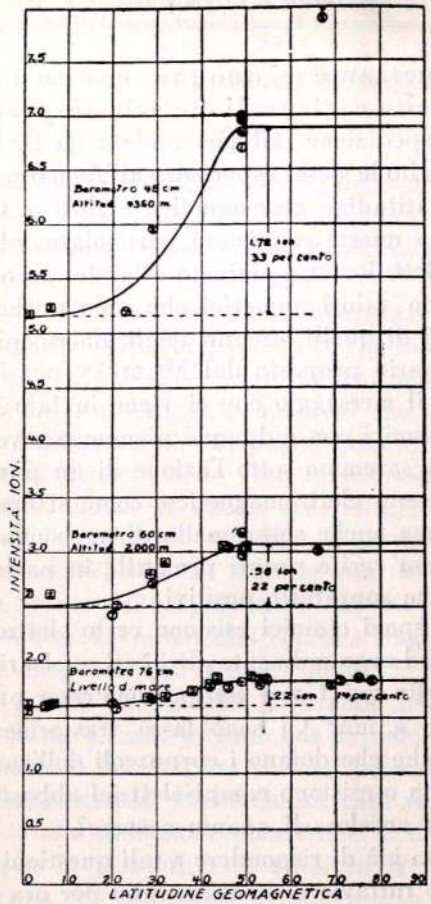


Fig. 81. — I resultati ottenuti dai ricercatori dell'organizzazione del COMPTON. Dal livello del mare fino a 4500 metri si ha sempre l'effetto di latitudine previsto dalla teoria: l'intensità della radiazione cioè decresce a partire da una certa distanza dal polo andando verso l'equatore.

ne penetrante è dunque costituita da particelle cariche di elettricità positiva.

Una spedizione italiana guidata da B. Rossi ha eseguito le stesse esperienze all'Asmara, a 11° 30′ di latitudine geomagnetica e 2370 m di altezza. In queste condizioni particolarmente favorevoli B. Rossi è arrivato alla stessa conclusione con valori numerici che sono anche piú brillanti di quelli ottenuti dagli americani.

Il cifrario proposto dal Millikan per interpretare il messaggio che ci viene inviato dagli spazi cosmici non è dunque pienamente valido. Noi non saremmo sotto l'azione di un puro irraggiamento elettromagnetico, come si credeva prima, ma anche sotto quella di un bombardamento con veri e propri proiettili, in parte negativi, ma sopratutto positivi.

Negli spazi cosmici esistono certo elettroni e protoni ed eventualmente altri enti nucleari sconosciuti fin qui. Come essi possono esser proiettati fino a noi? Ci sono lassú trasformazioni energetiche che dotano i corpuscoli dell'energia necessaria o esistono campi elettrici abbastanza forti per accelerarli quanto occorre?

Si tenta già di rispondere a tali questioni; ma diremmo tuttavia che sarà meglio per ora contenere la fretta dell'immaginare, se non si vuole veramente che le pubblicazioni sulla radiazione cosmica aumentino in modo sproporzionato ai resultati che rappresentano.

Reazioni fra raggi cosmici e materia. - L'elettrone positivo.

Prima di ogni altra cosa sembra necessario ormai ricercare la massa dei corpuscoli positivi che costituiscono la radiazione penetrante, primaria o secondaria che essa sia.

In altri casi la natura di un irraggiamento è stata ricavata dalle sue reazioni con la materia; il neutrone, di cui si è parlato nel capitolo precedente, informi. Anche i fenomeni che seguono l'assorbimento della radiazione cosmica nella materia diranno qualche cosa in proposito.

Siamo in attesa di questo resultato. Intanto l'urto fra i corpuscoli cosmici e la materia ha rivelato novità circa la materia piuttosto che circa la natura del corpuscolo. Come era infatti da prevedere la radiazione cosmica disintegra i nuclei materiali con grande facilità.

Nel 1927 D. Skobeltzyn, lavorando nell'istituto di M.me Curie, ottenne con la camera di condensazione del Wilson traccie indeviate da campo magnetico di 15 000 Gauss. Esse vennero attribuite alla radiazione penetrante. E da esse si dedusse la possibilità di studiare la radiazione stessa con la camera di condensazione del Wilson.

A questo si accinsero nel 1932 C. D. Anderson del *California Institute of Technology*, l'Istituto del Millikan, e a piccola distanza P. Blackett e G. Occhialini a Cambridge nel *Ca-*

vendish Laboratory. I resultati dell'una e dell'altra ricerca sono usciti successivamente.

ANDERSON ha lavorato con una comune camera del WILSON, disposta in un campo magnetico di 12 000 Gauss d'intensità.

BLACKETT e OCCHIALINI invece si sono serviti di una camera del WILSON posta fra i poli di un elettromagnete che dava soli 2000 Gauss; il meccanismo che metteva in moto lo stantuffo della camera era comandato dalla scarica che avveniva in due contatori di GEIGER e MÜLLER posti uno sopra e l'altro sotto la camera stessa. Solo cioè quando un corpuscolo della radiazione penetrante traversava i due contatori, e quindi la camera, si aveva l'espansione.

Le registrazioni di ANDERSON erano affidate al caso. Quelle di BLACKETT e OCCHIALINI avvenivano invece a colpo sicuro. Per questo ANDERSON ha dovuto fare 3000 fotografie per ottenere i resultati che BLACKETT e OCCHIALINI hanno ricavato con 700.

Le linee generali di questi resultati sono:

1°) Le traccie fotografate partono da un punto della camera ("sciami", in inglese *showers*) indicando che qui è arrivata una particella penetrante e ha disintegrato un nucleo del materiale che è vicino all'apparecchio o che costituisce la sua parete. La radiazione penetrante cioè produce effetti assai profondi sul nucleo e dà luogo a grande abbondanza di prodotti di disgregazione.

2°) Queste traccie sono di elettroni, e di protoni; piú di protoni che di elettroni.

3°) È noto che le traccie degli elettroni hanno aspetto diverso da quello dei protoni. Esse sono perfettamente distinguibili dalle prime perché piú sottili e piú sensibili al campo magnetico. Gli elettroni appunto dal campo magnetico, sono piegati da una certa parte. Ebbene sia ANDERSON che BLACKETT e OCCHIALINI nelle loro fotografie hanno trovato traccie che, pur avendo le caratteristiche degli elettroni, sono deviate in senso opposto a quello delle traccie elettroniche, epperò dalla stessa parte degli ioni positivi (Tav. XIII).

La radiazione penetrante libera dunque dalla materia l'elettrone positivo. Questo non era mai riuscito in nessun cimento fisico a cui la materia è stata sottoposta. Nel momento stesso in cui si stava per dubitare dell'esistenza della carica positiva come ente separato dalla materia, e si stava per credere che la carica elettrica positiva fosse una proprietà intrinseca della parte pesante dell'atomo, la scoperta fatta ci è venuta a salvare da fantasticherie e costruzioni teoriche inutili.

Si dice che la teoria preveda talvolta l'esperienza. P. A. M. DIRAC aveva fatto una teoria generale dell'elettrone e nelle sue soluzioni trovava l'esistenza di un ente, la cui energia cinetica era negativa. Era stato detto: la cosa non ha significato fisico. L'elettrone con energia cinetica di senso opposto a quella dell'altro elet-

trone piú vecchio e meglio noto ha ora significato. E glielo ha dato l'esperienza.

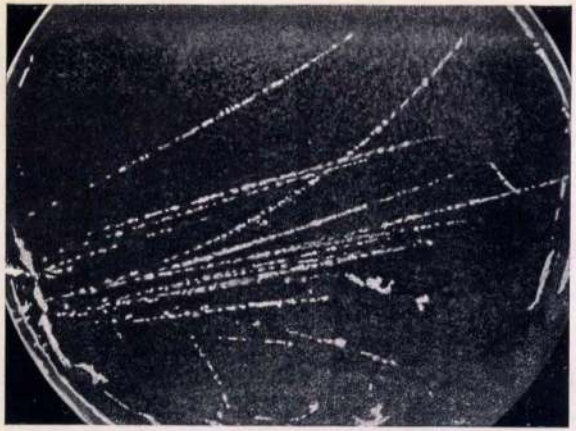
DIRAC deduce dalla sua teoria che la vita libera dell'elettrone positivo deve esser brevissima, dell'ordine di un centomillesimo di milionesimo di secondo. Questo giustifica il ritardo della sua scoperta e la difficoltà di metterlo in evidenza.

È però da dubitare che i corpuscoli primari della radiazione penetrante siano proprio elettroni positivi i quali hanno vita tanto breve; piú probabile sembra che essi siano protoni.

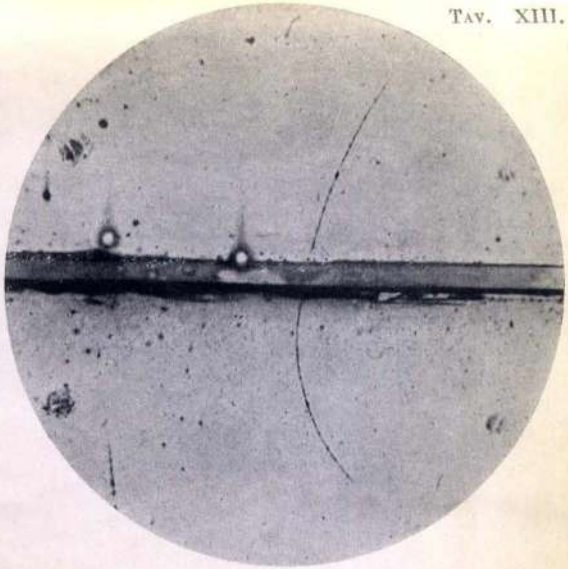
La materializzazione della energia radiante.

Gli studiosi di raggi cosmici sono ora alle prese con gli "sciami" di particelle liberate dalla radiazione cosmica. Il metodo dei contatori a triangolo inaugurato dal ROSSI e che ha permesso la prima segnalazione degli "sciami", quello della camera del WILSON controllata da due o piú contatori ideata da BLACKETT e OCCHIALINI sono volti precisamente all'analisi dei prodotti di disintegrazione dell'agente che si vuol conoscere.

Dai suoi effetti si spera cosí risalire alla conoscenza della sua natura. I primi resultati che in questo nuovo campo di indagine si sono ottenuti indicherebbero che i corpuscoli cosmici primari non sono generalmente i produttori degli "sciami"; che esiste una radiazione generatrice la cui natura e il cui rapporto coi corpu-



a) Traccie di corpuscoli liberati dalla radiazione cosmica e penetrati nella camera del Wilson. Alcune di esse sono curvate dal campo magnetico di circa 2000 Gauss in cui si trova la camera. Notare che alcune traccie sono piegate in alto e altre d'aspetto identico in basso (P. Blackett, G. Occhialini).



b) Traccia di un elettrone positivo che traversando uno schermo di piombo diminuisce di velocità e perciò dal campo che domina nella camera del Wilson che attraversa è piegato più fortemente (C. D. Anderson).

scoli è per ora imprecisato. Noi non ci attardiamo tuttavia su questo punto ancora sotto studio; preferiamo, perché piú utile allo scopo che ci proponiamo in questi ultimi capitoli, insistere alquanto nella considerazione del nuovo ente che la radiazione cosmica ci ha aiutato a separare dalla materia: l'elettrone positivo o positrone[1].

In realtà è da domandare perché mai chi ha avuto in mano per tanto tempo la camera del WILSON e sostanze radioattive emettenti raggi γ non l'abbia notato prima. Forse perché alla camera del WILSON non sono mai stati applicati prima campi magnetici intensi o perché era facile confondere questo ente insospettato con altri di vita piú lunga e meglio noti. Certo è che immediatamente dopo la prima evidenza del positrone ottenuto da ANDERSON, BLACKETT e OCCHIALINI ci si accorse che esso può venire liberato dalla materia che lo imprigiona anche con mezzi di laboratorio.

L. MEITNER e K. PHILIPP, i coniugi JOLIOT lo hanno ottenuto irraggiando materiale vario coi raggi γ piú energici che diano le sostanze radioattive, i raggi emessi da torio C'' o con quelli che accompagnano l'emissione dei neutroni dal berillio, che sono anche piú potenti.

Sopra vecchie fotografie, che SKOBELTZIN aveva eseguito alla camera del WILSON traversata da un fascio di raggi γ del torio C'' e posta

[1] *Si dovrebbe dire positone (ente positivo). Ma non pare il caso di correggere qui la denominazione sfuggita all'*ANDERSON *al momento della scoperta.*

in campo magnetico molto intenso, oggi si sono notate traiettorie che erano certo state prodotte da positroni.

La liberazione del positrone dal nucleo irraggiato da raggi γ è accompagnata da quella di un normale elettrone. Inoltre le energie di questi due enti, piú l'equivalente energetico delle loro masse (poco piú di mezzo milione di volt ciascuna), danno come valore totale l'energia del quanto γ incidente.

Il processo di liberazione del positrone e relativo elettrone per azione dei raggi γ deve dunque pensarsi come una trasformazione del quanto nei due corpuscoli, trasformazione che può verificarsi solo nell'ambiente favorevole del nucleo atomico. Poiché a questi corpuscoli attribuiamo appunto una massa, possiamo dire che avviene nel nucleo una vera e propria materializzazione dell'energia radiante, accettando una locuzione proposta da M.me CURIE.

È chiaro che sarà suscettibile di questa materializzazione solo un quanto di almeno 1,02 milioni di volt, che è la somma dell'energia equivalente delle due masse elettroniche.

Naturalmente è anche da domandare cosa avviene quando l'elettrone positivo scompare. L'elettrone positivo può scomparire, dematerializzarsi, quando ne incontra uno negativo libero in riposo o uno negativo fortemente legato a un nucleo materiale. Lasciamo altri modi di annichilimento che hanno minore probabilità. Secondo la teoria, del resto, il primo processo ha

la maggiore probabilità e deve dare luogo alla formazione di due fotoni emessi in direzioni opposte con energia eguale a mezzo milione di volt. Il secondo processo invece deve dare un solo fotone di un milione di volt.

L'esperienza eseguita da vari autori coi positroni della radiazione cosmica e con quelli ottenuti dai raggi γ del torio C'' hanno messo in evidenza solo raggi γ di mezzo milione di volt, confermando cosí la teoria del DIRAC sulla dematerializzazione degli elettroni negativi.

Dal complesso di questi resultati si ha una volta di piú l'impressione che i due elettroni siano connessi a trasformazioni energetiche e che l'elettrone negativo in queste trasformazioni non sia che un parassita, per cosí dire, del positivo. Si rafforza cioè quella concezione della struttura e dei meccanismi nucleari di cui abbiamo detto alla fine del capitolo VII.

CAPITOLO IX

LA RADIOATTIVITÀ ARTIFICIALE

L'origine del fenomeno. La scoperta della radioattività artificiale prodotta da particelle α. La radioattività prodotta dai neutroni. I neutroni lenti. Le energie nucleari. Conclusione.

ERA da lungo tempo opinione piuttosto diffusa che il fenomeno della radioattività, che si manifesta nella sua forma piú appariscente presso gli elementi alla fine della tavola periodica, cioè presso gli elementi piú pesanti e piú carichi di elettricità, fosse una proprietà generale della materia. Se il ferro, per esempio, — si diceva — non si comporta come l'uranio, si è perché la sua vita media è tanto lunga e la sua attività cosí debole che sfugge alla nostra capacità di osservazione.

Questa opinione era rafforzata dal fatto che di qualche elemento relativamente leggero si era messa in evidenza una lieve attività. Cosí alcuni metalli alcalini, in particolare il potassio, emettono elettroni di notevole energia. Di recente poi anche presso le terre rare sono state constatate deboli attività spontanee. Il samario emette particelle α molto lente e il neodimo, in proporzione anche piú piccola, deboli raggi β.

Nessuno però sperava di poter rendere radioattivo a piacere un elemento qualsivoglia. O, se qualcuno lo aveva sperato, e aveva detto di sperarlo, era stato classificato fra le persone non

serie. In effetto le tante delusioni raccolte in questo campo erano per lo piú conseguenza di tentativi, dagli attuali punti di vista, insensati.

Nemmeno lo si sperava forse quando si è visto che pure era possibile trasmutare un elemento in un altro. Si pensava che all'atto della disintegrazione ogni nucleo sapesse da sé scegliere la condizione di equilibrio stabile e, per espulsione del componente piú adatto, raggiungesse subito il suo stato finale.

Invece questo non è vero. Vi sono certe regole generali di disintegrazione; e l'elemento le segue fedelmente, anche se il suo avvenire non si presenta come inalterabile e definitivo, anche se, dopo, altri fatti dovranno verificarsi, perché sia raggiunta la necessaria condizione di stabilità.

TABELLA DEGLI ISOTOPI

Elementi	Z	m	%	Elementi	Z	m	%
H	1	1	99,98	C	6	12	99,29
		2	0,02			13	0,71
		3	10^{-7}	N	7	14	99,62
He	2	4	100			15	0,38
Li	3	6	7,6	O	8	16	99,76
		7	92,4			17	0,04
						18	0,20
Be	4	(8)	(0,05)	F	9	19	100
		9	99,95	Ne	10	20	90,00
B	5	10	19,84			21	0,27
		11	80,16			22	9,73

Elementi	Z	m	%	Elementi	Z	m	%
Na	11	23	100	V	23	51	100
Mg	12	24	77,4	Cr	24	50	4,9
		25	11,5			52	81,6
		26	11,1			53	10,4
						54	3,1
Al	13	27	100				
Si	14	28	89,6	Mn	25	55	100
		29	6,2				
		30	4,2	Fe	26	54	5
						56	95
P	15	31	100				
				Co	27	59	100
S	16	32	96				
		33	1	Ni	28	58	
		34	3			60	
						61	
Cl	17	35	76			62	
		37	24				
		(39)	—	Cu	29	63	68
						65	32
A	18	36	0,33				
		38	0,05				
		40	99,62	Zn	30	64	50,4
						66	27,2
K	19	39	94,7			67	4,2
		41	5,3			68	17,8
						70	0,4
Ca	20	40	97				
		[41]	<0,1	Ga	31	69	60
		42	0,8			71	40
		43	0,2				
		44	2,3				
				Ge	32	70	21,2
Sc	21	45	>97			72	27,3
						73	7,9
Ti	22	46				74	37,1
		47				76	6,5
		48					
		49		As	33	75	100
		50					

Elementi	Z	m	%	Elementi	Z	m	%
Se	34	74	0,9	Ru	44	96	5
		76	9,5			(98)	?
		77	8,3			99	12
		78	24,0			100	14
		80	48,0			101	22
						102	30
		82	9,3			104	17
Br	35	79	50	Rh	45	103	100
		81	50				
Kr	36	78	0,42	Ag	47	107	51
		80	2,45			109	49
		82	11,79				
		83	11,79	Cd	48	106	
		84	58,85			(108)	?
		86	16,70			110	14
						111	12
Rb	37	85	75			112	24
		87	25			113	10
						114	35
Sr	38	86	10,0			115	
		87	6,6			116	5
		88	83,4			(118)	?
Y	39	89	100	In	49	(113)	
						115	
Zr	40	90		Sn	50	112	1,07
		91				114	0,74
		92				115	0,44
		94				116	14,19
		96				117	9,81
Nb	41	93	100			118	21,48
						119	11,02
Mo	42	92	14,2			120	27,04
		94	10,0			121	2,96
		95	15,5			122	5,03
		96	17,8			124	6,19
		97	9,6				
		98	23,1	Sb	51	121	56
		100	9,8			123	44

Elementi	Z	m	%	Elementi	Z	m	%
Te	52	122	2,9	Sm	62	144	3
		123	1,6			147	17
		124	4,5			148	14
		125	6,0			149	15
		126	19,0			150	5
		(127)	?			152	26
		128	32,8			154	20
		130	33,1				
				Eu	63	151	50,6
I	53	127	100			153	49,4
X	54	124	0,08	Gd	64	155	21
		126	0,08			156	23
		128	2,30			157	17
		129	27,13			158	23
		130	4,18			160	16
		131	20,67				
		132	26,45	Tb	65	159	100
		134	10,31				
		136	8,79	Dy	66	161	22
						162	25
Cs	55	133	100			163	25
						164	28
Ba	56	135	5,9				
		136	8,9	Ho	67	165	100
		137	11,1				
		138	74,1	Er	68	166	36
						167	24
La	57	139	100			168	30
						170	10
Ce	58	140	89				
		142	11	Tm	69	169	100
Pr	59	141	100	Yb	70	171	9
						172	24
Nd	60	142	36			173	17
		143	11			174	33
		144	30			176	12
		145	5				
		146	18	Lu	71	175	100

Elementi	Z	m	%	Elementi	Z	m	%
Hf	72	176		Hg	80	199	16,45
		177				200	23,77
		178				201	13,67
		179				202	29,27
		180					
						(203)	(0,006)
Ta	73	181	> 98			204	6,85
W	74	182	22,6	Tl	81	203	29,4
		183	17,3			205	70,6
		184	30,2				
		186	29,9	Pb	82	(203)	0,04
						204	1,50
Re	75	185	38,2			(205)	0,03
		187	61,8			206	27,75
						207	20,20
Os	76	186	1,0			208	49,55
		187	0,6			(209)	0,85
		188	13,4			210	0,08
		189	17,4				
		190	25,1	Bi	83	209	100
		192	42,5				
				Th	90	232	> 97
Hg	80	196	0,10				
		(197)	(0,01)	Ur	92	238	> 97
		198	9,89				

L'origine del fenomeno.

Noi possediamo una tavola ormai ben ricca, che elenca tutti gli elementi e i loro isotopi. Essa riassume il lavoro iniziato nel 1914 da F. W. Aston in Cambridge e continuato vigorosamente da lui, dai suoi collaboratori e da ricercatori di altri paesi con tutti i mezzi disponibili di accertamento del valore delle masse atomiche

degli elementi: dallo spettrografo di massa a quello ottico (Cap. I). Questa tavola non è ancora completa; ma quello che manca riguarda o poche sostanze meno facilmente accessibili allo studio o gli isotopi piú rari degli elementi già studiati.

Ora questa tavola dice una cosa importante: in corrispondenza di un determinato numero atomico, cioè di un certo numero di cariche elementari positive, si presenta la possibilità di svariati, talvolta numerosi aggruppamenti di masse unitarie. Questi aggruppamenti sono però limitati.

Anche gli aggruppamenti accertati non sono tutti egualmente probabili; alcuni isotopi sono infatti piú abbondanti di altri. Per esempio lo stagno, che può esistere con ben 11 masse diverse, è piú ricco nella massa 120 e piú povero in quella 115, di cui nello stagno comune è presente solo il 4 per mille.

Alcuni elementi fra quelli a numero atomico dispari o non hanno isotopi o al piú ne hanno due soli. Esistono anche elementi a diverso numero atomico e masse eguali (isobari), ma il caso non è frequente. Ad ogni modo in generale per uno di essi la probabilità di un dato valore della massa è piú grande assai che per gli altri. Piombo, tallio, mercurio possono avere tutti e tre la massa 203, ma mentre il tallio possiede su cento 29 atomi di questo peso, il piombo ne ha solo 0,4 e il mercurio 0,06 ogni mille.

Le ragioni di tutto questo non si conoscono ancora bene, per quanto si intuiscano e vari tentativi siano stati fatti per esprimere le condizioni di equilibrio di neutroni e protoni. (Cap. VII). Ma i fatti stanno cosí. Non si può cambiare a volontà la carica o la massa di un elemento e se si riescisse a farlo in generale si porterebbe il nucleo in una condizione innaturale.

Era vano porre il problema di tentare questo cambiamento di cariche o di masse quando non si era sicuri di poterlo fare. Ma ormai sappiamo che si può introdurre in un nucleo una delle note particelle leggere — ioni di elio, protoni, diploni, neutroni — e sappiamo anche che per lo piú quando una di esse supera le barriere dei potenziali nucleari rimane prigioniera. Il cambiamento di carica e di massa è già allora avvenuto, ma per lo piú il processo non si arresta qui e si verifica invece uno dei seguenti fatti: quando il nucleo riceve una particella α si libera di un protone o di un neutrone; quando riceve un protone si libera di un ione di elio a peso 4 (o 3); quando riceve un neutrone espelle una particella α o un protone.

Dopo di questi avvenimenti il sistema ha ancora carica e massa diversa da quella che aveva prima. Ora, avvenga o no la disintegrazione, dopo che il nucleo ha ricevuto un corpuscolo esterno, se la sua carica e la sua massa sono comprese fra quelle della tabella degli isotopi, cioè rispondono a condizioni di equilibrio dura-

turo, il processo nucleare cessa immediatamente. È il caso dei fenomeni descritti nel capitolo VII. Se invece il nuovo nucleo non è compreso fra quelli possibili, allora dopo una vita limitata, esso si dissolverà ancora fino a raggiungere le condizioni di uno degli elementi della tavola.

Cosí se l'alluminio riceve una particella α ed espelle un protone diviene silicio a peso 30 (Cap. VII). Poiché il silicio a peso 30 esiste nella proporzione del 4 % fra il silicio normale, tutto si arresta. Se invece, dopo aver accolta la particella α, l'alluminio emette un neutrone, alla maniera del berillio, esso diviene fosforo a peso 30. Ora il fosforo a peso 30 non esiste naturalmente; il fosforo non ha isotopi e pesa 31 unità. Il fosforo a peso 30 è dunque in uno stato instabile e deve disfarsi di qualche cosa per diventare un sistema nucleare durevole. Se avesse la buona idea di liberarsi di una carica positiva si trasformerebbe appunto in silicio a peso 30, stabile.

L'alluminio stesso bombardato con neutroni cattura il neutrone e perde una particella α: diviene cosí un sodio a peso 24, che non è elencato nella tabella degli isotopi. Se questo si liberasse allora di una carica negativa diventerebbe magnesio 24, che, secondo il solito documento, pare abbia tutti i diritti all'esistenza.

In questi casi l'alluminio rimane nello stato intermedio un tempo piú o meno lungo. Da questo tempo di permanenza nello stato in-

stabile dipende la vita dell'elemento che in via transitoria si è formato e i cui atomi a poco per volta si andranno distruggendo cosí come si distruggono i prodotti di trasformazione del radio.

La scoperta della radioattività artificiale prodotta da particelle α.

È nell'accertamento di questi fatti insospettati prima ed ora, a cose fatte, evidenti e semplici, che consistono le scoperte fatte a distanza di pochi mesi dai coniugi JOLIOT a Parigi e da E. FERMI a Roma; i primi usando le particelle α del polonio come materiale aggressivo e il FERMI i neutroni del berillio.

I coniugi JOLIOT si accorsero infatti che una foglia di alluminio sottoposta per alcuni minuti all'irraggiamento del loro preparato di polonio continuava ad essere attiva anche dopo che era stata sottratta la sorgente attivante. L'alluminio emetteva positroni, la cui intensità si riduceva a metà solo dopo 3 minuti e 15 secondi.

Questo alluminio attivato è stato sciolto in acido cloridrico; si ha allora, come è noto, liberazione di idrogeno. Mentre il sale disciolto rapidamente portato a secco si è mostrato inattivo, l'idrogeno raccolto in un tubo di vetro portava con sé l'attività. Se lo stato transitorio dell'alluminio irradiato è quello di fosforo, questo, sotto forma di idrogeno fosforato, prodottosi a contatto con l'idrogeno nascente, deve appunto seguire il gas.

L'alluminio irradiato è stato pure sciolto in acido a cui è stato aggiunto fosfato di sodio e un sale di zirconio. Il precipitato di fosfato di zirconio cosí ottenuto era attivo. Il che dimostrava come l'elemento di transizione fosse appunto un isotopo del fosforo.

Naturalmente tutte queste operazioni chimiche vanno compiute in tempo brevissimo. La radioattività artificiale ha cosí inaugurato anche l'èra delle analisi chimiche a grande velocità.

Per il medesimo trattamento coi raggi α del polonio anche boro e magnesio hanno dato luogo a formazione di elementi radioattivi. Precisamente il boro, fissata una particella α, emette un neutrone, perciò diviene azoto a peso 13, instabile. Coll'emissione successiva di un positrone si forma carbonio 13, stabile.

Il magnesio può comportarsi in due modi diversi. O segue la stessa via del boro e dell'alluminio e allora diviene silicio instabile e poi di nuovo alluminio stabile. Se però dopo la cattura della particella α si libera di un protone diviene alluminio a peso 28, instabile. Solo coll'espulsione di un elettrone si raggiunge di nuovo l'equilibrio; si ha infatti il silicio 28 stabile.

Gli elementi di transizione corrispondenti ai quattro casi elencati sono stati denominati dai JOLIOT: radiofosforo, radioazoto, radiosilicio e radioalluminio.

È interessante notare che gli elettroni positivi emessi da radiofosforo, radioalluminio e radio-

silicio presentano spettro continuo (Fig. 82) come i negativi delle sostanze radioattive a trasformazione β. Questo indica una volta di piú le strette relazioni esistenti fra gli ioni dei due segni, di cui abbiamo fatto qualche cenno nel capitolo VII e nel capitolo VIII.

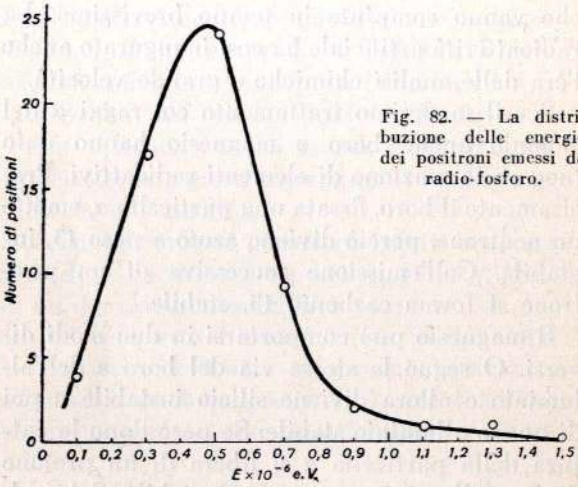


Fig. 82. — La distribuzione delle energie dei positroni emessi da radio-fosforo.

La radioattività artificiale messa in evidenza dai Joliot ha anche una caratteristica diversa da quella spontanea: questa si manifesta solo per particelle α e β. La nuova radioattività ha luogo talvolta anche per positroni.

Le esperienze di radioattività artificiale sono state ripetute da altri autori ed estese per le particelle α a qualche altro elemento oltre quelli

studiati dai JOLIOT, come litio e fluoro. Ma anche altri aggressori sono stati messi alla prova in Cambridge e in America e precisamente protoni e diploni. Coi primi resultato positivo è stato ottenuto solo presso carbonio. Invece tutti gli elementi da litio a cloro (salvo Ne e S non saggiati) piú il calcio, bombardati con diploni di 3 milioni di volt, hanno mostrato di attivarsi con emissione di positroni e raggi γ.

Di particolare rilievo è la attivazione ottenuta con questi agenti dal sodio per l'imponenza del fenomeno, la durata dell'attività e la qualità dei raggi γ che accompagnano la disintegrazione.

La radioattività prodotta dai neutroni.

Ma se le particelle α hanno concesso la scoperta, ai neutroni è forse affidato il compito di esaltar il valore e render piú generale e forse pratica la radioattività artificiale degli elementi.

A parità d'intensità di sorgente il numero di neutroni disponibili è inferiore a quello delle particelle α che li devono produrre. Tuttavia l'efficacia del neutrone, a causa della sua mancanza di cariche elettriche (Cap. VII), è ben superiore a quella della particella α. Perciò E. FERMI e i suoi collaboratori a Roma coi neutroni liberati dal berillio con particelle α dell'emanazione di radio, a cui il berillio era mescolato, sono riusciti a ottenere la radioattività artificiale non solo da elementi leggeri ma anche da pesanti, come il torio e l'uranio. Già piú di 57

elementi radioattivi nuovi sono accertati in luogo dei 5 o 6. che si conoscevano per merito delle particelle α. La sostanza attivata dal processo di cattura del neutrone e successiva emissione di un corpuscolo α o di un protone, emette raggi β, accompagnati talvolta sí, talvolta no, da raggi γ. Il tipo di trasformazione non è dunque nuovo come quello eccitato dai raggi α.

Il ferro, che dà un effetto molto intenso, si trasforma dopo cattura del neutrone ed eliminazione di un protone in manganese a peso 56, che è instabile. Questo emettendo un elettrone di energia media pari a 1,3 milioni di volt torna a ferro 56 stabile (Fig. 83). Che il prodotto attivo sia proprio manganese è stato provato chimicamente. Se si scioglie il ferro irradiato in acido nitrico, si aggiungono piccole quantità di un sale di manganese e si precipita poi questo elemento come biossido per aggiunta di clorato sodico, l'attività viene trascinata dal biossido di manganese.

La vita media del manganese attivo è rilevante; la sua attività si riduce a metà in due ore e mezza.

Ma ci sono elementi che durano anche di piú; solfo e cloro dànno luogo a elementi radioattivi la cui vita media è di 13 giorni.

Si presenta coi neutroni anche qualche caso in cui il processo di disintegrazione iniziale manca. L'elemento, assorbito il neutrone, diviene un isotopo di se stesso instabile. Esso emette poi un elettrone e in generale può diventare un isotopo

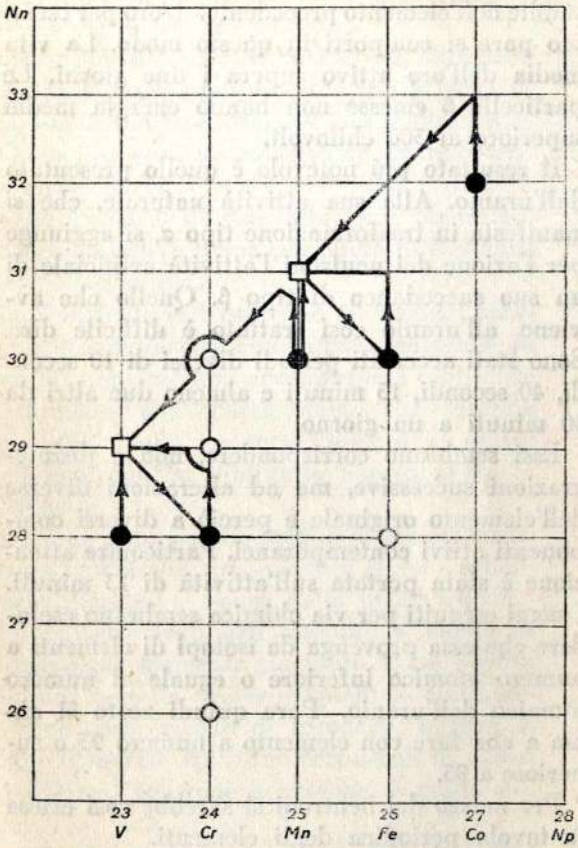


Fig. 83. — Illustrazione delle trasformazioni degli elementi con numero atomico compreso fra Z=23 e Z=27. Le ascisse rappresentano il numero dei protoni nucleari, le ordinate quello dei neutroni. Gli isotopi stabili sono dati dai circoletti pieni se l'isotopo costituisce piú del 20 % dell'elemento, gli altri dai circoletti vuoti. I quadratini denotano gli isotopi radioattivi e le linee con freccie le successive trasformazioni.

stabile dell'elemento precedente. L'oro per esempio pare si comporti in questo modo. La vita media dell'oro attivo supera i due giorni. Le particelle β emesse non hanno energia media superiore ai 300 chilovolt.

Il resultato piú notevole è quello presentato dall'uranio. Alla sua attività naturale, che si manifesta in trasformazione tipo α, si aggiunge per l'azione dei neutroni l'attività artificiale di un suo succedaneo di tipo β. Quello che avviene all'uranio cosí trattato è difficile dire. Sono stati accertati periodi diversi di 10 secondi, 40 secondi, 13 minuti e almeno due altri da 40 minuti a un giorno.

Essi sembrano corrispondere, non a disintegrazioni successive, ma ad alterazioni diverse dell'elemento originale e perciò a diversi componenti attivi contemporanei. Particolare attenzione è stata portata sull'attività di 13 minuti. I saggi eseguiti per via chimica sembrano escludere che essa provenga da isotopi di elementi a numero atomico inferiore o eguale al numero atomico dell'uranio. Pare quindi certo si abbia a che fare con elemento a numero 93 o superiore a 93.

Per mezzo dei neutroni si sarebbe cosí estesa la tavola periodica degli elementi.

I neutroni lenti.

I neutroni che sono stati usati in tutte le esperienze descritte hanno cammino libero in aria a pressione atmosferica di qualche metro. Essi

sono dotati cioè di energia che si può valutare a piú decine di milioni di volt.

Contrariamente ad altri casi in cui l'efficacia del sistema bombardante cresce con la sua velocità, i neutroni aumentano il loro potere e manifestano proprietà singolarissime quando vengono rallentati.

Anche questo nella sua forma piú generale è stato riconosciuto a Roma per opera di E. FERMI e suoi collaboratori.

Non è difficile rallentare un neutrone. Quando uno di essi incontra un atomo materiale in riposo gli imprime una accelerazione e gli cede cosí almeno una parte della sua energia (Cap. VII). Dopo un certo numero di questi urti il neutrone ha diminuita notevolmente la sua velocità.

Un solido o un liquido meglio di un gas costituiscono l'ambiente favorevole a questo rallentamento, perché a causa della maggiore densità il numero degli urti possibili a parità di percorso è enormemente maggiore. E fra i solidi e i liquidi sono da preferire quelli le cui molecole sono assai ricche di idrogeno, perché lo scambio d'energia fra i due corpuscoli di massa poco diversa, neutrone e protone, è molto piú facile.

È noto che precisamente facendo uso di uno schermo di paraffina sono stati rivelati per la prima volta i neutroni. Dalle molecole della paraffina i neutroni che l'attraversano staccano protoni molto efficaci.

Ora se un fascio neutronico si diffonde in un forte spessore di paraffina o di acqua perderà nelle numerose collisioni con gli atomi di idrogeno la sua energia iniziale e alla fine i suoi componenti si ridurranno a non possedere piú della velocità propria dei moti termici.

Cosí E. FERMI ha potuto studiare quello che avviene alle sostanze esposte all'azione di neutroni lenti.

Le sostanze venivano immerse in acqua o in grossi blocchi di paraffina in cui stava pure il preparato di polonio + berillio o radon + berillio.

In alcuni casi ad esempio, come rodio, argento, iodio, bromo, la radioattività artificiale veniva esaltata di un fattore compreso fra 10 e 100 unità. Quando un elemento ha piú periodi a causa delle diverse alternative di disintegrazione che si presentano dopo l'assorbimento del neutrone nel nucleo, come è il caso dell'alluminio, non tutti i processi vengono attivati ugualmente dai neutroni lenti. Dalle osservazioni fatte sin qui sembra che l'attività preferita sia sempre quella che corrisponde a isotopo instabile dello stesso elemento bombardato. Cioè quella cui dopo la ricezione del neutrone nel nucleo non si verifica espulsione di corpuscolo materiale.

Altri elementi invece dai neutroni rallentati non vengono attivati in maniera sensibile, sebbene li assorbano in maniera considerevole. Mentre uno strato di piombo che pesa 3,5 gr

per cm^2 non ha praticamente azione su di essi, una quantità poco superiore di acido borico li riduce a metà.

Talvolta il forte assorbimento è accompagnato da una emissione secondaria di raggi γ, Essi rappresentano forse l'energia liberata dal nucleo all'atto in cui ad esso si lega il neutrone.

Ma questo, che avviene con cadmio, mercurio, cloro, ittrio, iridio, non si verifica invece col boro. Questo elemento emette particelle α e si trasforma in litio. Il processo è tanto intenso da giustificare l'assorbimento anormalmente grande del boro pei neutroni lenti.

Anche altre sostanze oltre le idrogenate sono utili al rallentamento dei neutroni, ma non con la stessa efficacia della paraffina e dell'acqua.

Specialmente ora che coi neutroni lenti i fenomeni di radioattività artificiale sono stati esaltati al punto da essere comparabili a quelli della radioattività naturale si può notare come essa divenga uno strumento utilissimo per rivelare la presenza di neutroni. È appunto producendo l'effetto FERMI in iodio o bromo tenuti a contatto con metalli irraggiati con raggi γ o X di grande energia che SZILARD e CHALMERS hanno rivelato che essi emettono neutroni (Cap. VII).

Le energie nucleari.

Gli elementi che presentano attività propria possono riguardarsi come i sopravissuti di un periodo geologico in cui gli atomi nell'incandescente caos della materia si formavano e anda-

vano cercando attraverso esplosioni nucleari il loro naturale equilibrio. Essi sono i dinosauri, gli iguanodonti del microcosmo ed abitano ancora un'isola limitata della tavola periodica.

Ad arte noi siamo ormai riusciti a rinnovare quei primitivi processi, a rievocare i tempi lontani millenni di millenni in cui gli elementi andavano assumendo la loro costituzione definitiva. Noi abbiamo cosí ringiovanita la materia in un'opera grandiosa e poetica.

Ma l'umanità è utilitaria e ama accanto alla poesia ammirare frutti concreti. Gli elementi radioattivi naturali mettevano a nostra disposizione una notevole varietà di radiazioni corpuscolari ed elettromagnetiche di grande energia. Questo nostro possedimento mercé le disintegrazioni e la radioattività artificiale si è allargato sia per la qualità che per la gamma energetica dei corpuscoli o delle onde elettromagnetiche, che spesso li accompagnano. E la serie delle acquisizioni non è ancora chiusa; forse altri corpuscoli, oltre che altre forme di attività nucleare, si metteranno in seguito in evidenza. I vantaggi di questo saranno esclusivamente di carattere scientifico?

È stato detto che l'intensità e la durata di alcuni nuovi fenomeni radioattivi permetterà probabilmente in breve ora di volgerli a scopi benefici, quali quelli a cui già erano adibiti certi corpi naturalmente radioattivi.

Ma è chiaro che non è solo per sentirsi par-

lare di estensione di metodi terapeutici che il profano si interessa alle scoperte della fisica.

Le equazioni che rappresentano le reazioni nucleari da un valore simbolico possono assumerne uno meccanico preciso se in esse si scrivono anche i valori delle energie impegnate nei singoli processi. Di tre tipi sono le energie che vi possono comparire: quelle cinetiche dei corpuscoli incidenti ed espulsi, quelle elettromagnetiche delle radiazioni liberate, e infine quelle delle variazioni di massa che intervengono nei nuclei di nuova formazione. Ma, qualunque sia il nome che essa porta, l'energia connessa con fenomeni nucleari ha sempre un ordine di grandezza assai elevato. Già molte volte nel testo della nostra esposizione abbiamo usato una locuzione suggestiva per esprimerla: milioni di volt.

È precisamente il sentir pronunciare queste cifre che alletta il profano e lo incuriosisce. Rispondere alla sua legittima aspettativa parlando solo di medicine per le miserie della nostra carne è deludere chi ascolta e umiliare la scienza che con tanta fatica le produrrebbe. Il male è un accidente inevitabile della vita, ma non è la vita, che è fatta di gioventú e di salute. Per alimentare le attività della vita cosa contano le cifre dei fisici nucleari? Questo desidera sapere il profano.

E qui bisogna stare attenti a non fare del *bluff*, a non gettare della polvere negli occhi giocando su un equivoco assai facile.

Le energie immagazzinate in un nucleo sono enormi in effetto, come abbiamo già avuto occasione di rilevare. Quelle però che si sprigionano nei fenomeni radioattivi naturali o artificiali sono grandi solo da un punto di vista relativo, cioè confrontate con le energie elementari che si possono liberare dagli atomi in processi chimici o fisici ordinari.

E noi possiamo contare solo sulle energie che si liberano dai nuclei, non su quelle che essi contengono; cosí come possiamo contare sopra il calore che mandiamo nella macchina termica e non su tutto quello che esiste per esempio nel grande serbatoio terrestre.

Non perdiamo poi di vista che parlare di un certo numero di volt d'energia è usare una locuzione convenzionale per esprimere la velocità di una particella. Tale numero rappresenta la differenza di potenziale del campo elettrico in cui essa andrebbe introdotta per farle acquistare cineticamente l'energia che essa possiede. Se dalla convenzione si passa alle unità naturali d'energia, con un milione di volt per elettrone noi non ci troviamo di fronte a piú di 1,6 milionesimi di erg. Per raccogliere quindi le potenze occorrenti per i piú modesti bisogni della pratica è necessario contare sul numero delle particelle da utilizzare nell'unità di tempo. Ora con 1 grammo di radio che in un secondo ci dà 37 000 milioni di raggi α molto energici noi non disponiamo che di 0,15 watt al massimo. Con la tenue spesa di un milione circa di

lire non raccogliamo dunque nemmeno tanto da accendere una lampadina tascabile.

Se poi invece del radio o suoi derivati noi volessimo valerci delle disintegrazioni artificiali, il cui rendimento è dell'ordine del milionesimo, si vede che l'economia andrebbe di male in peggio.

Diverso è quanto avviene con le energie elementari, un milione di volte piú piccole, che mette a nostra disposizione la chimica. Il prezzo unitario riferito a un atomo di carbonio che brucia, per esempio, è qui tanto piccolo che nulla limita il numero di atomi da bruciare per ottenere il numero di calorie che dobbiamo produrre pei nostri scopi.

Il combustibile nucleare è dunque per ora troppo raro e troppo caro per poter esser considerato seriamente utilizzabile.

Non parliamo poi dell'uso di protoni accelerati artificialmente. Questi si ottengono con impianti elettrici costosi: utilizzare di tutto l'impianto solo la minima parte di energia che è localizzata nell'accelerazione dei protoni e le conseguenti disintegrazioni, sarebbe commettere la piú grossa delle sciocchezze elettrotecniche. I soliti gruppi motori e trasformatori valgono senza paragone piú di tutti i processi nucleari.

Si crede che uno spiraglio di speranza apra in questo nero pessimismo la considerazione dei neutroni e della loro ancora non ben accertata potenza.

Certo si può dire fin d'ora che non serviranno

a nulla i neutroni che si ottengono artificialmente per mezzo di sostanze radioattive o impianti ad alto potenziale, finché con essi non si saprà liberare l'energia immagazzinata in un nucleo tutta in una volta e non, come avviene ora, per piccole frazioni.

Allo stato attuale delle cose poi solo una sorgente di neutroni naturale e poco costosa potrebbe risolvere il problema in modo conveniente. A ogni urto neutronico corrisponde spesso qui una disintegrazione. Si avrebbe quindi in questo caso un rendimento elevatissimo. Purtroppo però la sorgente di neutroni economica, per cui varrebbe la pena di studiare il processo con cui mettere in relazione il microcosmo con i congegni di grande scala necessari a una macchina, oggi ancora non si conosce.

Conclusioni.

Ogni viso ha i suoi tratti caratteristici; noi abbiamo in questi capitoli tracciato il viso della fisica d'oggi.

Essa nella parte che ha raggiunto una relativa conclusione e stabilità è dominata da un pensiero teorico rappresentato dalla forma ondulatoria della meccanica corpuscolare, come dalla forma quantistica delle reazioni energetiche. Quest'ultima è stata il frutto del lavoro compiuto fra il 1900 e il 1915; l'altra si è formata fra il 1920 e il 1930. In quel periodo quasi ogni giorno il teorico annunciava una meraviglia, mentre lo sperimentalista era messo in disparte.

Egli segnava il passo accanto al teorico che gli suggeriva le idee, che ne guidava le mani.

E giustamente, perché si trattava di un periodo di sintesi; in quel momento si doveva tirare le somme di quanto si era imparato in un trentennio; si doveva ragionare, discutere, sistemare le idee.

Ma dopo il 1930 le cose sono cambiate. Esauriti i problemi atomici e le relative applicazioni alla struttura molecolare, con le questioni suscitate dal nucleo, la parola è di nuovo all'esperienza. È questa che ogni giorno ora annuncia una nuova scoperta.

Costituenti materiali impensati, possibilità di disintegrazioni e di sintesi nucleari, reazioni energetiche nuove...

Una nuova chimica si presenta e forse alle soglie sta pure una nuova meccanica. Ma vano e banale è far profezie in materia in cui ancora troppi sono i moti e le masse nascoste, per dirla alla maniera dell'HERTZ. Certo il problema dell'essere e del non essere della materia ci tiene in questo momento in attesa ansiosa, che giustifica qualunque velleità di anticipare il futuro.

INDICE DEI NOMI

Ampère A. M. 29, 31
Anderson C. D. ... 233, 237
Aston F. W. ... 20, 140, 246
Auger P. 230

Balmer J. J. .. 121, 122, 127
Becker A. 196
Becquerel E. .. 153-156, 160
Bémont G. 156
Bernoulli D. .. 90, 93, 97-99, 102
Blackett P. ... 192, 233-237
Bohr N.... 124, 125, 126, 128, 129, 133, 134, 137, 142, 148, 149, 150
Bothe W. 196, 222
Boyle R. 36
Bradley G. 35
Bragg W. 71, 73, 75
Brickwedde, *v.* Urey.

Campbell N. 218
Carpe A. 228
Chadwick J. 25, 191, 194, 197, 209
Chalmers T. A., *v.* Szilard.
Chladni 147-149
Compton A. .. 51-54, 56, 181, 197, 228, 230
Coven T. 228
Curie (coniugi) 12, 156
Curie P. 156
Curie I. 196
Cockcroft J. D. ... 199, 204
Coulomb 177

d'Arsonval 29
Davisson C. J. ... 67, 68, 70, 73, 74, 85
Davy 7
Debierne A. 156
de Broglie L. 85-87, 97, 98, 144
de Broglie M. 18, 85
Debye P. 72, 73
Dirac P. A. M. 235, 239
Doppler 9

Einstein A. ... 30, 31, 48, 50, 56, 87, 116, 126
Ellis C. D. 25
Euclide 33

Faraday 68
Feather N. 208
Fermi E. 212, 226, 230, 250, 253, 257
Ferraris G. 32
Fizeau 89
Foucault 41
Franck 128-131
Fresnel A. 40

Galileo Galilei .. 3, 34, 87, 88
Gamow G. 175, 178, 179
Geiger H. 26-28, 30, 167, 168, 179, 222
Germer L. H., *v.* Davisson.
Gerthsen C. 200
Goldhaber 209
Grimaldi F. M. ... 35, 39, 60

Halley 39
Heaviside 96
Heisenberg W. 104-106, 112, 142, 211
Hertz E. 42, 44, 123, 124, 150, 265
Hertz G., *v.* Franck.
Hess V. F. 219
Hooke R. 35, 37, 39, 40
Huyghens C. .. 35, 39, 40, 89

Kirsch G. 191
Klein 181
Kolhörster W. 219, 222

Joliot (coniugi) 250, 253
Joliot F. 196

Laue M. 13
Lawrence E. O. 200, 201, 203
Lemaitre 226
Lenard P. 30, 31
Le Prince-Ringuet L. ... 230
Leonardo da Vinci . 34, 59, 60
Livingston 201, 203
Lyman T. 122, 127

Majorana E. 211
Malus 40
Marconi G. 12, 32
Mariotte 39
Maxwell J. C. 42
Meitner L. 181, 208, 237
Mendelejeff 137, 140
Millikan C. ... 1, 66, 142, 219, 220-222, 224, 228, 232
Monge 94
Moseley C. 138, 139, 142
Murphy, *v.* Urey.

Newton I. .. 5, 6, 31, 33, 36, 37, 39, 40, 56, 57, 63, 87, 89, 90, 97
Nishina, *v.* Klein.
Nobili L. 29
Nuttall J. M. .. 167, 168, 179

Occhialini G. 233-237

Pacini D. 218
Pacinotti A. 32
Petterson H. O. 191
Piccard A. 1, 219
Philipp K. 237
Poincaré E. 150, 153
Pose H. 195
Planck M. 45, 46, 48, 50, 74, 98, 111, 126-128, 149
Plutarco 119

Rausch von Traubenberg H. 204
Rayleigh (Lord) .. 44, 46, 82
Ritz W. .. 120, 122, 126, 127, 133, 134, 142, 150
Römer O. 35
Rossi B. .. 224, 226, 230, 232
Röntgen 12, 153, 154
Rupp E. 70
Rutherford E. 25, 125, 136, 137, 142, 150, 190, 191, 197, 217

Scherrer, *v.* Debye.
Schmidt G. C. 156
Schrödinger E. ... 85, 97-99, 102, 104, 117, 144, 148, 149
Schweigger 29
Sklodowska M. 156
Skobeltzyn D. 233, 237
Simon 53, 54
Sloan D. H. 200
Sommerfeld A. 142, 144, 150
Stefan J. 43, 44
Szilard L. 210, 259

Tibaud J. 200
Thomson G. P. ... 68, 69, 73
Thomson J. J. ... 19, 20, 124, 125, 140
Thomson W. 29

Urey H. C. 21

Vallarta, *v.* Lemaitre.
Volta A. 7

Walton E. T. S., *v.* Cockcroft.
Wien W. 43, 44, 46
Wilson C. .. 22, 23, 25, 28, 53, 159, 208, 236, 237

Young T. 40

INDICE ANALITICO

Accelerazione di corpuscoli carichi (ioni, elettroni), 189, 199 e segg.
Anelli di Newton, 36, 63.
Assorbimento (spettro d'), 9; meccanismo dell'— nell'atomo, 127; dei raggi cosmici in acqua, 220; in piombo, 224, 225.

Barriere di potenziale (in generale), 113 e segg.; nucleari, 173 e segg., 177.
Battimenti, 80.

Camera di condensazione (o di Wilson), 21 e segg., *passim*.
— *di ionizzazione*, 24 e segg.; del Millikan, Tav. X; del Compton, 229; di Kolhörster, Tav. X.
Contatori a filo (o di Geiger e Müller), 26, *passim*.
— *a punta* (o di Geiger e Kemplerer), 26, 27.
— *in coincidenza*, 222 e segg., *passim*.
Costante universale del Planck, 46, 74, 111.

Deviazione di corpuscoli carichi (ioni, elettroni), 17, 18.
Deuterio, 21, 205.
Deutone, 199 e segg., 205, 206, 208, 209 e segg.
Diffrazione della luce, 59 e segg., 107, 108.
— *dei raggi X* (metodo Bragg), 71; (metodo Debye e Scherrer), 72, 73.
— *degli elettroni*, 7; (esperienza Davisson e Germer), 68, 69, 75; (esp. Thomson), 69, Tav. VII; (esp. Rupp), 70.
Diffusione dei raggi X (*v.* effetto Compton).
— delle particelle α, 169 e segg.
Dimensioni atomiche, 168; elettroniche, 66; nucleari, 168 e segg.
Diplogeno, *v.* deuterio.
Diplone, *v.* deutone.
Disintegrazioni artificiali (con raggi α), 190 e segg.; (con raggi γ), 209, 210; (con raggi X di grande energia), 210; (con protoni), 204 e segg.; (con diploni), 205; (con neutroni), 206 e segg.

Effetto Doppler, 9; *Compton*, 51 e segg., 109; *fotoelettrico*, 46 e segg.; *Fermi* (*v.* radioattività artificiale per neutroni).
Elettrone negativo (carica), 66; massa, 14, 66; raggio, 66; come pacchetto d'onde, 77; lunghezza dell'onda associata, 73, 74; sua rifrazione, 74 e segg.; diffrazione, 68 e segg.; accelerazione, 67.
— *positivo* (*v.* positrone).

Emissione della luce, 128, 129; dei raggi X, 136; dei raggi α, 211 e segg.; dei raggi β, 178 e segg.
Energia (dualismo), 33 e segg., 56 e segg.; nello spettro continuo (*v.* legge di Wien); irraggiata da corpo nero (*v.* legge di Stefan).
Equazione del raggio, 90 e segg.; *di Bernoulli*, 93; *di Schrödinger*, 97 e segg.

Famiglie radioattive, 163, 164.
Frange di diffrazione (*v.* diffrazione).
Frequenza di vibrazione, 64 (nota).

Indeterminazione (*v.* principio di —).
Indice di rifrazione, 74, 94.
Intensità della luce, 99 e segg.; dei raggi cosmici, 221, 226 e segg., 230 e segg.
Interferenza di vibrazioni, 37, 38.
Isotopi inerti, 20, 21; radioattivi, 163, 164; loro struttura, 213; tabella, 242 e segg.

Legge di Moseley, 138; *di Geiger e Nuttall*, 167, 179; *di Lord Rayleigh*, 44; *di Ritz*, 122; *degli spostamenti radioattivi*, 162, 163; *di Stefan*, 43; *di Wien*, 43; *dell'equivalenza fra massa ed energia*, 87, 174.
Livelli energetici degli atomi, 128, 129 e segg., 135, 138, 139, 141, 143, 149.
— — del nucleo, 180 e segg., 194 e segg., 212.
Lunghezza d'onda, 64 (testo e nota), 160; (associata), 73, 74.

Macchie solari, 10.
Materializzazione dell'energia radiante, 238 e segg.
Meccanica ondulatoria, 84, 112 e segg.
Microscopio di Heisenberg, 106 e segg.
Modelli atomici, 123, 124, 125, 142 e segg.

Neutrino, 212.
Neutrone, 195 e segg., 198, 208, 210-212, 253 e segg., 256 e segg.
Numero atomico, 140, 162.

Onde stazionarie, 145 e segg.

Pacchetto di onde, 81.
Parabole del Thomson, 19, 140.
Polarizzazione della luce, 40.
Positrone, 235, 237 e segg., 250-252.

Principio di indeterminazione o di Heisenberg, 110.
— *di Bohr*, 126.
— *di Ritz*, 120 e segg.
Probabilità di un evento, 101, 102.
Protone, 15, 126, 127, 174, 204 e segg., 211, 212.

Quanto di radiazione, 45.

Radiazione penetrante, 216, 218, 220, 225 e segg. (*v.* anche assorbimento, intensità e sciami).
Radioattività spontanea, 153 e segg.; artificiale, 241 e segg.
Raggi X, 11 e segg., 51 e segg., 72 e segg., 76, 109, 133 e segg., 210.
— α, 14, 157 e segg., 178 e segg., 190 e segg.
— β, 14, 157 e segg., 182 e segg., 211 e segg., *passim* in radioattività artificiale.
— γ, 15, 109, 157 e segg., 180 e segg., 209 e segg., *passim*.
— *cosmici* (*v.* radiazione penetrante).
— *positivi* o *del canale*, 14.
Relatività, 87, 116.
Rifrazione della luce, 33, 34, 40, 41, 94-96; degli elettroni, 75, 76.

Scalare di campo, 102.
Sciami di corpuscoli, 234, 235.
Serie spettrali, 121, 127.
Showers (*v.* sciami).
Spettri ottici, 7-10; dei raggi X, 13.
— *di massa*, *di velocità*, *magnetici*, 16.
— *di raggi* β (*v.* raggi β).
— *di positroni* (*v.* positroni).
Spettroscopio ottico, 5 e segg., 11, 60, 61; *per raggi X*, 11 e segg.; *di massa*, 19, 20; *di velocità*, 18, 19.
Spintariscopio, 25.
Stato stazionario dell'atomo, 126.
Struttura atomica, 120, 141, 143, 149; *nucleare*, 211 e segg.

Tavola periodica degli elementi, 137, Tav. VIII, 142, 143.
Trasmutazioni artificiali (*v.* disintegrazioni).

Velocità della luce, 35, 40 e segg.; di fase, 83, 103; di gruppo, 83, 103.
Vettore luminoso, 42.
Vita media di uno stato energetico dell'atomo, 127; di un corpo radioattivo, 165; del positrone, 236.

Questo volume della Collezione Hoepli
è uscito in Milano, via Marcona 50, dalle Officine delle
Industrie Grafiche Italiane Stucchi
il 18 dicembre dell'anno XIV

ENG
24-9-42

olivetti
BIBLIOTECA, Sezione B
Reg. N. 1543
Data 26-6-42

IN · LABORE
VIRTVS · ET · VITA